This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

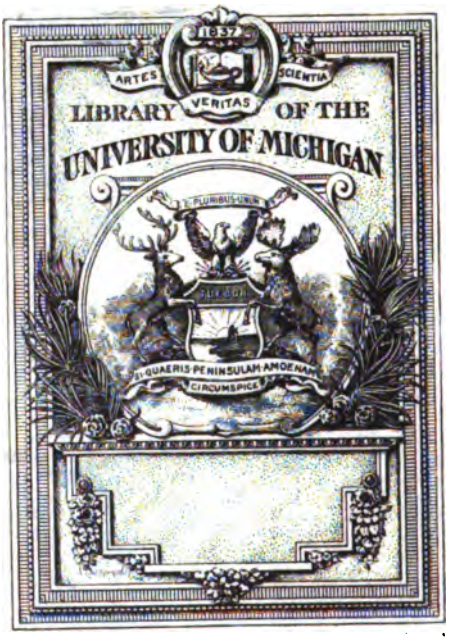
+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

B 466600


1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE

ENGINEERING
LIBRARY
UF
820
.H14

COURS

DE

BALISTIQUE INTÉRIEURE

COURS

DE

BALISTIQUE INTÉRIEURE

PAR

EDM.nd HAESEN

CAPITAINE-COMMANDANT D'ARTILLERIE,

INGÉNIEUR ÉLECTRICIEN,

PROFESSEUR A L'ÉCOLE D'APPLICATION DE L'ARTILLERIE ET DU GÉNIE.

BRUXELLES

MAISON D'ÉDITION ALFRED CASTAIGNE

28, RUE DE BERLAIMONT, 28

1904

Tous les exemplaires sont revêtus de la signature de l'auteur.

Bibliothèque pédagogique

PRÉLIMINAIRES.

§ 1.

Définitions. — Objet de la balistique intérieure.

1. On nomme *explosif* tout composé chimique qui peut engendrer, en un temps très court, une masse gazeuse à une très haute température, quand on le soumet à une excitation extérieure.

Le moyen employé pour exciter l'explosif constitue l'*amorçage*.

2. Si l'on considère les circonstances actuelles, dans lesquelles les explosifs sont mis en œuvre par l'artillerie, on constate ce qui suit :

1° l'amorçage est provoqué par le frottement, le choc, l'électricité, le contact d'un corps en ignition ;

2° la durée de la production des gaz est toujours inférieure à $\frac{1}{10}$ de seconde ;

3° la température initiale de ces gaz est au moins égale à 2000° centigrades.

3. C'est à la suite de perfectionnements apportés aux compositions incendiaires, en usage dans l'antiquité, qu'on découvrit le mélange explosif de salpêtre, de soufre et de charbon de bois, connu sous le nom de *poudre noire*.

141736

Les armes à feu prirent alors naissance, et se substituèrent aux vieilles machines de guerre, pour réaliser des effets balistiques plus puissants.

Employé d'abord à l'état de poussière, l'explosif primitif fut mis ensuite sous forme fragmentaire ou grenée, en vue de le protéger contre l'humidité, de le rendre plus maniable, voire plus efficace, et bien qu'il perdit de cette manière l'aspect pulvérulent, on lui conserva le nom de poudre.

4. Ainsi constituée, cette poudre fut, durant des siècles, le seul explosif en usage dans les armées ; mais, grâce aux efforts combinés et soutenus de la science et de l'industrie, on connaît aujourd'hui un grand nombre de substances chimiques, de nature à remplacer avantageusement ce mélange dans ses diverses applications.

Parmi ces substances, certaines conviennent particulièrement pour le tir des armes à feu, elles reçoivent la forme grenée ; dans la technologie actuelle on les appelle aussi *poudres*.

5. La *balistique intérieure* est une science ayant généralement pour objet d'établir les principes qui président au choix des poudres, et de déterminer les lois du mouvement des projectiles dans les armes à feu.

Elle fournit au constructeur du matériel d'artillerie, les éléments nécessaires à l'élaboration de ses projets, en lui indiquant l'idéal à poursuivre et les écueils à éviter.

En vue de déterminer les effets produits par les substances explosives, dans toutes les circonstances où elles sont utilisées par l'artillerie, nous avons élargi un peu le domaine attribué à la balistique intérieure, en y envisageant le cas où ces substances agissent pour provoquer l'explosion des projectiles.

6. On appelle *charge*, la masse explosive prélevée pour créer un effet déterminé.

La *chambre de l'explosif* est la capacité destinée à contenir la charge.

On distingue deux espèces de charges : les *charges de tir* et les *charges de rupture* ou *charges explosives*.

Les premières sont utilisées dans les armes à feu pour lancer les projectiles.

Les secondes sont mises dans les projectiles, destinés à décimer les troupes ou à détruire les obstacles matériels.

---

§ 2.

De l'organisation des explosifs.

7. Exposons quelques considérations sur l'état physique, la composition chimique et la constitution mécanique des explosifs, afin de fixer les liens rattachant notre sujet à des notions scientifiques antérieures, plus générales.

8. État physique des explosifs. — A l'*état initial*, c'est-à-dire, immédiatement après sa préparation, l'explosif peut être solide ou liquide.

Ainsi, le fulmi-coton est un explosif solide ; la nitroglycérine est un explosif liquide.

L'artillerie préfère n'utiliser que des explosifs solides, parce qu'ils sont d'un maniement et d'une appropriation relativement faciles.

9. Composition chimique des explosifs. — On réalisa d'abord des *mélanges explosifs*, en rapprochant par un travail mécanique, des corps combustibles, tels que le soufre et le charbon de bois, et des corps comburants, comme l'azotate de potassium et le chlorate de potassium. La poudre noire est le type de ces mélanges.

Plus tard, lorsqu'on eut accompli quelques progrès dans le domaine de la chimie, on produisit des *combinaisons explosives*, en unissant par leurs affinités chimiques les corps combustibles et les corps comburants. Le picrate de potassium est un explosif de cette deuxième catégorie.

Enfin, lorsque l'expérience eut établi le rôle important de l'oxygène combiné, on créa des *explosifs complets*, en associant des explosifs riches en oxygène avec des explosifs pauvres en oxygène. La dynamite-gomme, obtenue par la combinaison de la

nitroglycérine et du fulmi-coton soluble, est un explosif de cette troisième espèce. (*)

10. Constitution mécanique des explosifs. — On admet que les explosifs sont formés, comme tous les corps, par la réunion de molécules, et les molécules par le groupement d'atomes.

On suppose aussi que les molécules d'un corps, de même que les atomes d'une molécule, sont séparés par des intervalles imperceptibles, dans lesquels ils se meuvent.

Du reste, nous envisagerons les atomes comme des points matériels, et les corps, comme des systèmes de points matériels soumis à des forces.

(*) Les explosifs dans lesquels l'oxygène n'intervient pas, comme le chlorure d'azote, n'ont reçu, jusqu'à présent, aucune application industrielle ou militaire.

CHAPITRE I.

LES CARACTÉRISTIQUES DES EXPLOSIFS.

---

§ 1.

Le covolume de l'explosif.

11. Nous nommerons *covolume d'un explosif*, la somme des volumes des atomes contenus dans l'unité de poids des gaz qu'il peut engendrer.

Supposons qu'une substance explosive soit amenée, à l'état gazeux, dans une capacité fermée de toutes parts, et soient :

Q le poids de la charge ;

V le volume de la chambre ;

η le covolume de l'explosif.

Dans ces conditions de chargement, l'expression

$$V - \eta Q$$

représente le volume inoccupé par la matière, pendant ses transformations physiques et chimiques, nous l'appellerons *volume réduit de la chambre.*

12. Imaginons maintenant qu'on réduise graduellement la quantité V, le volume réduit de la chambre convergera alors vers une certaine limite, au-dessous de laquelle on ne pourra descendre, sans rendre l'amorçage et la gazéification de la charge impossibles.

Si nous désignons par βQ cette limite, nous aurons :

$$V - \eta Q \geqq \beta Q,$$

ou encore :

$$V \geqq (\beta + \eta) Q.$$

La quantité β dépend de la nature de l'explosif et des conditions d'amorçage ; sa détermination ne relève que de l'expérience.

13. Hypothèse sur la compacité des explosifs en usage dans l'artillerie. — Lorsqu'une substance explosive homogène a été comprimée de manière à occuper, à l'état initial, et sous l'unité de poids, un volume équivalent au covolume de cette substance, nous dirons qu'elle forme une *masse compacte*.

Dans ce qui va suivre, nous admettrons toujours qu'une charge de rupture est formée d'une seule masse compacte, et qu'une charge de tir est composée d'un grand nombre de petites masses compactes ou grains.

Cette hypothèse n'amènera aucune erreur sensible ; en effet, une charge de rupture subit des tassements considérables *(n° 85)*, pendant le trajet du projectile dans l'âme et dans l'obstacle à détruire ; et les grains d'une charge de tir reçoivent une compression très énergique, au cours de la fabrication.

D'ailleurs, si l'on détermine expérimentalement la quantité η et le volume réel α occupé par la substance explosive, sous l'unité de poids (*), on constate que la différence

$$\alpha - \eta$$

est de même ordre que les écarts d'expériences, elle est donc négligeable.

(*) La quantité α est égale à l'inverse de la densité d de l'explosif.

Parmi les substances explosives en service, la poudre noire est celle qui est la moins compacte.

En adoptant pour unités le kilogramme et le décimètre cube, on trouve, pour cette poudre :

$\eta = 0{,}600$ (Expériences de Noble et d'Abel).

$\alpha = 0{,}602$ pour $d = 1{,}66$.

§ 2.

De l'énergie de l'explosif.

14. L'énergie totale du système matériel qui constitue l'explosif, se compose de deux parties : l'énergie cinétique et l'énergie potentielle.

On sait que l'énergie cinétique est égale à la valeur actuelle de la somme des forces vives des points matériels du système.

On sait aussi, que l'énergie potentielle est égale au maximum absolu du travail que les forces intérieures pourront accomplir, si l'on envisage toutes les transformations possibles du système.

Nous nommerons *énergie spécifique de l'explosif*, la quantité d'énergie totale qu'il contient sous l'unité de poids.

15. Supposons que la substance explosive considérée se transforme en gaz, dans une capacité fermée de toutes parts, à parois indéformables et imperméables à la chaleur, capacité que nous appellerons simplement, *vase clos*.

Soient alors, pour l'état initial :

U_0 l'énergie spécifique de cette substance ;

W l'énergie cinétique et Π l'énergie potentielle correspondantes.

Nous avons, par définition :

$$W + \Pi = U_0. \qquad (1)$$

Désignons maintenant par W_1 l'énergie cinétique et par Π_1 l'énergie potentielle des gaz formés.

En vertu du principe de la conservation de l'énergie, nous obtenons :

$$W_1 + \Pi_1 = U_0, \qquad (2)$$

et en combinant les deux relations précédentes, nous trouvons :

$$\Pi\left(1+\frac{W}{\Pi}\right)=W_1\left(1+\frac{\Pi_1}{W_1}\right)=U_0. \qquad (3)$$

Or, il résulte de l'expérience, que les rapports $\frac{W}{\Pi}$ et $\frac{W_1}{\Pi_1}$ sont toujours très petits par rapport à l'unité, et que U_0 est très grand *(n° 17)*.

Cela nous permet d'envisager l'explosif comme un corps dans lequel on a accumulé, pendant la fabrication, une quantité énorme d'énergie potentielle, inutilisable sous cette forme, mais qu'on peut amener, en un temps très court, à l'état d'énergie cinétique, pour produire un effet déterminé.

§ 3.

Définitions et principes relatifs à la théorie des gaz.

16. Afin de montrer de quelle manière l'énergie spécifique d'un explosif intervient dans la production des phénomènes, nous nous appuierons sur quelques définitions et sur quelques principes de la théorie des gaz.

Imaginons que l'on ait reçu, en vase clos, les gaz provenant d'une charge ayant l'unité de poids, et déterminons les relations qui existent entre U_0 et chacune des quantités suivantes : la chaleur, la température absolue et la pression des gaz.

17. Quantité de chaleur des gaz. — On sait que l'énergie des gaz formés est proportionnelle à la quantité de chaleur qu'ils contiennent.

Ce qui nous permet d'écrire, en vertu de la relation (3) :

$$U_0 = E\,C_0, \tag{4}$$

expression dans laquelle C_0 représente la quantité de chaleur et E l'équivalent mécanique de la chaleur.

Dans les applications, nous exprimerons C_0 en calories, et nous adopterons pour E la valeur 425.

Le nombre de calories peut être déterminé par une mesure calorimétrique, et la relation (4) permet alors de calculer U_0.

Voici, pour fixer les idées, quelques résultats d'expériences :

DÉSIGNATION DE L'EXPLOSIF.	ENERGIE SPÉCIFIQUE. U_0 KILOGRAMMÈTRES.
Dynamite-gomme	634000
Cordite	491000
Dynamite ordinaire à 75 %	468000
Coton-poudre sec	450500
Tonite de Wetteren.	393000
Poudre noire.	311100
Fulminate de mercure.	148325

18. Température absolue des gaz. — La quantité de chaleur contenue dans l'unité de poids des gaz est proportionnelle à la température absolue de ces gaz.

Soient : T_0 cette température ;

c_v le coefficient de proportionnalité, c'est-à-dire, la chaleur spécifique à volume constant.

Nous avons :

$$C_0 = c_v T_0,$$

et en remplaçant dans cette expression C_0 par sa valeur, déduite de la formule (4), nous obtenons :

$$T_0 = \frac{U_0}{c_v E}. \qquad (5)$$

On sait d'ailleurs qu'il y a entre la température absolue T_0 et la température centigrade T_c corrélative, la relation :

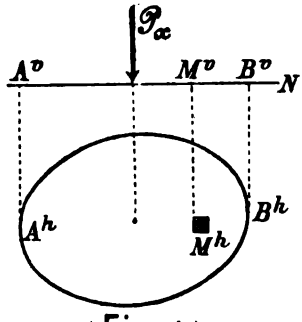
$$T_0 = T_c + 273.$$

19. Pression des gaz. — Rappelons maintenant quelques définitions relatives à la pression des gaz.

Concevons en un point O de l'espace, un système de trois axes rectangulaires ox, oy et oz.

Soit M un point pris à l'intérieur du vase clos ; menons par ce point un plan N perpendiculaire à l'axe ox ; cherchons la ligne d'intersection de ce plan avec la surface intérieure de la chambre ; représentons cette ligne par ses projections A^hB^h, A^vB^v sur deux plans, et nommons S l'aire qu'elle circonscrit.

Nous divisons ainsi la masse totale du fluide en deux parties, que nous nommerons F et F' (fig. 1).



(Fig. 1)

(Le plan horizontal de projection est perpendiculaire à l'axe ox.)

La pression totale de la masse gazeuse F' sur l'aire S est, comme on le sait, une force normale au plan N, nous la désignerons par $\mathcal{P}_x$.

Construisons maintenant au point M un rectangle de surface ΔS, en portant respectivement sur des parallèles aux axes oy et oz, des longueurs Δy et Δz, de manière que le point M soit le sommet du rectangle le plus voisin de l'origine ; la pression totale des gaz sur l'aire ΔS pourra être notée $\Delta\mathcal{P}_x$.

On sait d'ailleurs que le rapport $\frac{\Delta\mathcal{P}_x}{\Delta S}$, s'appelle la pression moyenne de la masse fluide F sur l'aire ΔS, et que la pression p_x

par unité de surface au point M, supposé fixe, est la limite vers laquelle converge ce rapport, lorsque les quantités Δy et Δz tendent simultanément vers zéro.

Nous aurons donc :

$$p_x = \frac{d\mathcal{P}_x}{dS}.$$

Les forces p_x appliquées normalement au plan N, aux divers points de l'aire S, représentent l'action de la masse fluide F sur la masse fluide F', et les forces égales et de signes contraires aux premières, mesurent l'action de la masse gazeuse F' sur la masse gazeuse F.

Nous avons supposé que le plan de section passant par le point M, est perpendiculaire à ox. En menant maintenant, par le même point, des plans respectivement perpendiculaires aux axes oy et oz, nous serons amené à considérer les pressions totales $\mathcal{P}_y$ et $\mathcal{P}_z$, et les pressions par unité de surface p_y et p_z.

20. Dans le cas des gaz, on a :

$$p_x = p_y = p_z = p,$$

et aussi :

$$\mathcal{P}_x = \mathcal{P}_y = \mathcal{P}_z = Sp,$$

la pression p étant donnée par la *fonction caractéristique* des gaz, c'est-à-dire, par la relation

$$f(p, T_0, V_0) = 0$$

entre la pression p en un point, la température absolue T_0 et le volume V_0 du vase clos contenant l'unité de poids des gaz.

Il résulte de nombreuses expériences, que pour des gaz à très

hautes températures, comme ceux engendrés par les explosifs, la fonction caractéristique prend la forme (*) :

$$p = \frac{RT_0}{V_0 - \eta},$$

R étant un paramètre dépendant de la nature du fluide et η le covolume de l'explosif.

Si nous remplaçons, dans cette dernière expression, T_0 par sa valeur déduite de la relation (5), nous obtenons :

$$p = \frac{RU_0}{c_v E (V_0 - \eta)},$$

et en posant :

$$\frac{R}{c_v E} = K,$$

il vient :

$$p = \frac{KU_0}{V_0 - \eta}.$$

Ainsi, *la pression en un point varie en raison directe de l'énergie spécifique de l'explosif, et en raison inverse du volume réduit de la chambre.*

Lorsqu'une charge Q du même explosif occupe une capacité de volume V, donné par :

$$V = V_0 Q,$$

on obtient la même pression p, car on peut écrire :

$$p = \frac{KU_0 Q}{V_0 Q - \eta Q} = \frac{KU_0 Q}{V - \eta Q}. \qquad (6)$$

(*) Voir le Mémorial des poudres et salpêtres. Tome V, page 137.

21. Résidus. — Certains explosifs ne se transforment pas totalement en gaz, comme nous l'avons supposé implicitement jusqu'ici, ils laissent des résidus. Par exemple, un kilogramme de poudre noire produit 435 grammes de gaz et de vapeurs, et 565 grammes de matières résiduelles (*).

A la température des réactions entre comburants et combustibles, les résidus sont dans un état de division extrême, ils restent en suspension dans la masse fluide et engendrent ainsi la fumée.

Lorsque des poudres à résidus sont tirées dans des armes à feu, les résidus adhèrent en partie aux parois, et comme ils durcissent par le refroidissement, ils encrassent ces armes.

L'artillerie emploie aussi des poudres ne donnant pas de matières résiduelles, elles sont nommées poudres sans fumée.

Quelles significations faut-il accorder aux quantités γ_1, U_0, C_0, T_0, c_v et K, dans le cas d'un explosif à résidus ?

Chaque fois que des gaz se trouvent en mélange intime avec des résidus, une partie de leur chaleur est cédée à ceux-ci, de manière à amener un équilibre thermique entre tous les produits formés, et alors les quantités ci-dessus se rapportent à l'unité de poids de ces produits.

(*) Ces chiffres résultent des expériences de Noble et Abel.

§ 4.

De l'inflammation de la charge.

22. Stabilité des explosifs. — Bien qu'il y ait un grand nombre d'explosifs, certains présentent peu d'intérêt, au point de vue des applications, parce qu'ils manquent de stabilité.

On dit qu'un explosif est *stable*, lorsqu'il conserve, jusqu'au moment de l'amorçage, toutes les qualités physiques et chimiques qu'il a reçues au cours de la fabrication.

Ainsi, il sera physiquement stable, s'il est exempt de cristallisation, d'évaporation, d'exsudation, de dilatation, etc.

Il sera chimiquement stable, si ses molécules gardent leur constitution atomique.

23. Avant de classer un explosif nouveau dans la catégorie des explosifs stables, il faut qu'il subisse avec succès, des épreuves relatives à la conservation, au transport et au maniement, épreuves dont nous donnerons ultérieurement les détails. *(n° 96.)*

L'instabilité d'un explosif est due principalement au manque d'affinité des constituants (*) ; on observe d'ailleurs que les difficultés de l'amorçage augmentent avec le degré de stabilité.

24. Explosifs d'amorce. — Pour amorcer facilement les charges, on fait intervenir des explosifs relativement peu stables, très sensibles aux actions mécaniques et à la chaleur ; on les nomme *explosifs d'amorce.*

Comme ces corps sont dangereux, on ne les emploie qu'en petites masses, et on les dispose dans des organes protecteurs, appelés, suivant les circonstances : étoupille, capsule ou fusée.

(*) L'impureté des matières premières est une cause évidente d'instabilité.

25. Définitions. — Pour faciliter l'étude de l'amorçage nous nous appuierons sur quelques définitions.

L'*énergie de l'amorce* est le produit de l'énergie spécifique U_o par le poids Q_a de l'explosif d'amorce.

Quand cette énergie a été déterminée, de façon à amener les éléments d'une masse explosive, en contact immédiat avec les gaz de l'amorce, à une température suffisante pour les décomposer, on obtient *l'inflammation* de la masse considérée.

La *durée d'inflammation* est le temps mis par l'amorce pour se résoudre en gaz.

La *surface d'inflammation*, est la surface de séparation de ces gaz et de la masse explosive, à la fin de l'inflammation.

Le *coefficient d'inflammation* représente la quantité d'énergie communiquée par l'amorce à l'unité de surface d'inflammation.

En désignant par Λ ce coefficient et par σ l'aire de la surface d'inflammation, nous aurons donc :

$$\Lambda = \frac{U_o\, Q_a}{\sigma}.$$

26. Hypothèse relative à l'inflammation des charges de tir. — Nous avons dit qu'une charge de rupture est formée d'une seule masse compacte, et qu'une charge de tir est composée d'un grand nombre de petites masses compactes ou grains.

Pour qu'il soit possible d'interpréter les particularités relatives à l'inflammation des charges de tir, il est nécessaire de recourir à une hypothèse.

Dans les conditions où ces charges sont tirées *(n° 103)*, on peut admettre l'inflammation simultanée des grains qui les composent. En d'autres termes, on peut supposer, sans modifier les effets des poudres, que tous les grains d'une charge sont enveloppés simultanément par les gaz de l'amorce, et dès lors, la surface d'inflammation d'un grain quelconque se confond avec la surface extérieure de ce grain.

27. Divers types d'amorces. — Les diverses amorces peuvent être ramenées à deux types : l'*amorce fusante* et l'*amorce détonante* ou *détonateur*.

La première est à base de chlorate de potassium et de sulfure d'antimoine, la seconde est à base de fulminate de mercure.

28. Choix de l'amorce. — Si l'on opère sur deux masses explosives identiques, avec des amorces fusante et détonante d'un même volume, on peut dire que la première agit sur une grande surface et communique à celle-ci une faible quantité d'énergie, tandis que la seconde localise son effet et produit une quantité d'énergie relativement considérable.

En désignant par Λ et Λ_s les coefficients d'inflammation de ces amorces, nous aurons donc :

$$\Lambda < \Lambda_s.$$

29. Afin de se placer dans les meilleures conditions, au point de vue de l'effet à produire *(n°s 70 à 79)*, on réserve les amorces fusantes pour l'amorçage des charges de tir et les détonateurs pour l'excitation des charges de rupture.

Lorsqu'on est fixé sur le choix du type d'amorce, il reste alors à déterminer judicieusement le poids Q_a ; il dépend de la nature de l'explosif à exciter et de la surface d'inflammation σ à créer.

Quand on a constaté que la prise de feu d'une certaine charge s'est faite convenablement, pour un système de valeurs Q_a et σ, on peut obtenir, par une proportion, la quantité Q'_a correspondant à la surface d'inflammation connue σ' d'une autre charge, si l'on admet que le coefficient d'inflammation est une constante pour un explosif et un type d'amorce désignés.

Nous donnons dans le tableau suivant des renseignements sur les organes de prise de feu des charges de rupture ; nous verrons plus loin quelles sont les dispositions adoptées pour l'amorçage des charges de tir *(n° 103)*.

Numéros des détonateurs cylindriques. (6mm de diamètre.)	1	2	3	4	5	6	7	8
Longueur du tube en cuivre rouge contenant le fulminate de mercure. mm.	17	27	29	40	45	52	60	70
Poids du fulminate de mercure. gr.	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
Poids moyen du détonateur chargé. gr.	1,17	1,67	2,02	2,79	3,52	4,47	5,12	5,80

On peut se rendre compte de l'énergie d'un détonateur, par le calcul ci-dessous, fait pour l'amorce n° 8 :

$$U_0 \; Q_a = 148325. \; 0{,}003 = 445 \text{ kilogrammètres.}$$

§ 5.

De la combustion de la charge.

30. Nous nommons :

combustion d'une masse explosive, le phénomène de la propagation des réactions chimiques dans toute la masse ;

durée de combustion, le temps nécessaire à cette propagation ;

surface de combustion, à l'heure t, la surface de séparation des gaz formés et de la matière explosive non comburée en ce moment. (*)

31. Influence du type d'amorce sur la chaleur dégagée par la combustion. — Pour déterminer l'influence du type d'amorce sur la quantité de chaleur engendrée par la combustion, on a placé successivement diverses charges, au sein d'une capacité fermée de toutes parts, et l'on a procédé à des expériences calorimétriques.

Il résulte de ces expériences que la combustion produit, à peu près, la même quantité de chaleur, quand on met en œuvre, tantôt l'amorce fusante et tantôt l'amorce détonante, toutes choses égales d'ailleurs.

Dans le tableau ci-contre, nous donnons les résultats de quelques essais. Les différences que l'on constate dans les nombres sont de l'ordre de grandeur des erreurs de mesure, elles peuvent provenir d'ailleurs de la différence des quantités de chaleur introduites par les amorces mêmes.

Ainsi, le choix de l'amorce n'a qu'une influence insignifiante sur la quantité de chaleur engendrée par la combustion d'une charge, mais d'autres essais *(n° 68)* permettent d'affirmer qu'il exerce une action considérable sur la durée de combustion de cette charge.

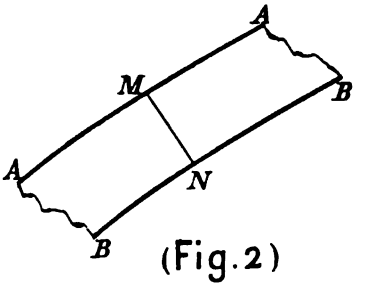
(*) La surface de combustion qui correspond à l'heure O se confond avec la surface d'inflammation.

NATURE DE L'EXPLOSIF.	Chaleur dégagée par kilogramme d'explosif, l'inflammation ayant été provoquée par une	
	amorce fusante.	amorce détonnante.
	COLORIES.	COLORIES.
Poudre noire.	731	732
Coton-poudre.	1056	1060
Acide picrique	828	868

32. Mode de combustion des explosifs. — Examinons maintenant de quelle manière se combure une masse explosive.

Représentons respectivement par A et B, les surfaces de combustion aux heures t et $t + \Delta t$.

Nous dirons que ces surfaces sont parallèles, lorsque les normales sont communes, et que les longueurs, comme MN (fig. 2), interceptées sur ces normales, sont égales. (*)



(Fig. 2)

(La figure représente les lignes d'intersection des surfaces de combustion A et B, avec un plan mené par une normale commune MN à ces surfaces.)

(*) Pour qu'il soit possible de construire une surface parallèle à une surface donnée, on sait que celle-ci ne peut être quelconque, elle doit satisfaire à des conditions, vérifiées pour les formes usuelles des grains.

Nous nommerons respectivement *couche brûlée* et *épaisseur brûlée* pendant le temps Δt, la masse explosive comprise entre les surfaces A et B, et la plus courte distance MN de ces surfaces.

Cela étant soient :

Q le poids de la masse explosive considérée, à l'état initial ;

Z l'épaisseur brûlée correspondant à la combustion complète de cette masse ;

Q' le poids de la couche brûlée, à l'heure t ;

z l'épaisseur brûlée, au même instant ;

u le rapport $\frac{z}{Z}$.

Comme la quantité Q' varie avec u, nous pouvons poser :

$$Q' = Q.\ F(u),$$

$F(u)$ étant une fonction qui dépend de la forme de la masse explosive ; nous l'appellerons *fonction de forme*,

33. Piobert observa, qu'à l'air libre, la combustion se propage par surfaces parallèles, dans une galette de poudre noire.

Les moyens d'investigation de son époque, ne lui permirent pas d'élargir le champ de ses expériences, d'opérer notamment sur des charges grenées et sous de très hautes pressions.

Mais on possède aujourd'hui des appareils perfectionnés, avec lesquels on sait analyser toutes les particularités de la combustion des explosifs.

Voici généralement comment on procède aux expériences, quand il s'agit de déterminer le mode de combustion des poudres :

On opère sur des charges de même poids et de même nature chimique, composées de grains géométriquement semblables.

Ces charges sont mises successivement dans la chambre d'un appareil, permettant d'enregistrer la pression des gaz à chaque instant de la combustion.

Si l'on rapporte alors les résultats des mesures à un système d'axes de coordonnées rectangulaires, on constate que les courbes obtenues ne diffèrent entre elles que par les échelles des durées de combustion, lesquelles varient proportionnellement aux dimensions homologues des grains.

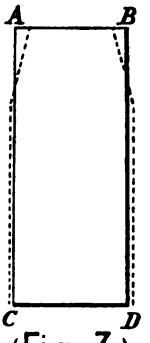
Dans le tableau suivant, nous reproduisons, pour mieux fixer les idées, les résultats des essais faits sur des charges grenées, avec une poudre au pyrocollodion, préparée au laboratoire de l'Amirauté russe.

Epaisseur des grains. — Millimètres.	Durées de combustion des charges. — Millièmes de seconde.	Rapports de similitude des grains et des durées de combustion des charges.
0,8	4,9	$\frac{4}{5}$, $\frac{49}{60}$
1,0	6,0	$\frac{5}{8}$, $\frac{60}{91}$
1,6	9,1	$\frac{8}{15}$, $\frac{91}{160}$
3,0	16,0	$\frac{3}{5}$, $\frac{160}{260}$
5,0	26,0	$\frac{25}{27}$, $\frac{260}{277}$
5,4	27,7	

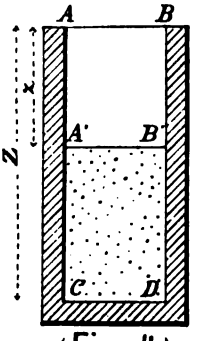
Ces résultats contrôlent aussi, nous semble-t-il, l'hypothèse de l'inflammation simultanée des grains.

En résumé, si l'on groupe tous les résultats de l'observation, et si l'on cherche à les interpréter par une loi, on est amené à dire que la combustion se propage par surfaces parallèles, dans toutes les circonstances où il n'y a pas lieu de craindre la désagrégation de la matière explosive, par l'action des pressions, ce qui advient, quand la charge se présente en une ou plusieurs masses compactes.

34. Fonction de forme relative aux charges de rupture. — Pour que nous puissions comparer ultérieurement, les effets produits par des charges de rupture formées d'explosifs différents, transformons préalablement ces charges, en des masses compactes cylindriques de même volume et de même longueur, en procédant comme nous l'indiquons ci-après (fig. 3).



(Fig 3)



(Fig. 4)

Imaginons alors que la masse explosive $ABCD$ soit disposée dans un cylindre métallique résistant, et que la surface d'inflammation se confonde avec l'aire de la section transversale menée par AB (fig. 4)

Soient : $Z = AC$, l'épaisseur brûlée correspondant à la combustion complète de la masse explosive considérée ;

$z = AA'$, l'épaisseur brûlée, à l'heure t.

Nous avons :

$$u = \frac{z}{Z} = \frac{Q'}{Q},$$

et dès lors,

$$F(u) = u.$$

35. Fonctions de forme relatives aux charges grenées.

Soient : N le nombre de grains identiques d'une charge de tir ;

q le poids d'un grain ;

$Q = Nq$ le poids de la charge ;

q' le poids de la couche brûlée d'un grain quelconque, à l'heure t ;

$Q' = \Sigma q'$ le poids des parties comburées des divers grains, à cet instant.

Si l'on admet l'hypothèse de l'inflammation simultanée des grains de la charge, ils se comburent tous dans les mêmes conditions, et l'on a :

$$\Sigma q' = Nq',$$

ce qui permet d'écrire :

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{Nq'}{Nq} = \frac{q'}{q} = F(u).$$

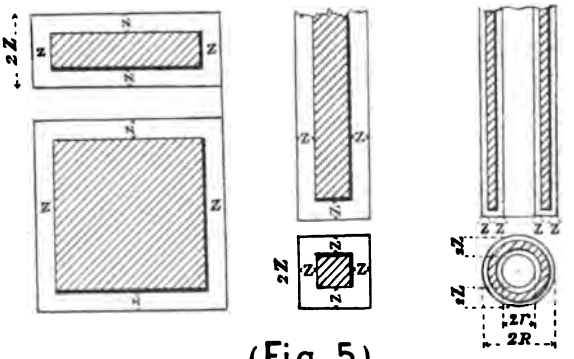
Ainsi, la fonction de forme est la même, qu'il s'agisse d'une charge grenée ou d'un grain de cette charge, et conséquemment, c'est la plus petite dimension ou l'épaisseur du grain qui règlera la durée de combustion.

36. Toutes les formes usuelles des grains peuvent être ramenées à trois formes types, savoir :

le parallélépipède rectangle aplati, à base carrée ;

le parallélépipède rectangle allongé, à base carrée ;

le tube cylindrique.



(Fig. 5)

Dans la figure 5, nous représentons ces formes, en marquant par des hachures les parties non comburées, à l'heure t.

37. Cherchons d'abord l'expression de $F(u)$ pour un grain ayant la forme du parallélépipède aplati, c'est-à-dire, d'une *lamelle*.

Soient : l le rapport de l'épaisseur $2Z$ à la plus grande dimension du grain ;
w le volume du grain, à l'instant initial de la combustion ;
w' le volume de ce grain, à l'heure t.

Nous aurons :

$$\frac{q'}{q} = \frac{w - w'}{w} = 1 - \frac{w'}{w} = F(u).$$

Mais le rapport $\frac{w'}{w}$ est donné par la relation :

$$\frac{w'}{w} = \frac{\left(\frac{2Z}{l} - 2z\right)^2 (2Z - 2z)}{\frac{4Z^2}{l^2} \cdot 2Z},$$

et en simplifiant, elle se réduit à :

$$\frac{w'}{w} = \left(1 - \frac{lz}{Z}\right)^2 \left(1 - \frac{z}{Z}\right).$$

Remplaçons dans l'expression ci-dessus $\frac{z}{Z}$ par u, et développons, il vient alors :

$$\frac{w'}{w} = 1 - (1 + 2l)u + (2l + l^2)u^2 - l^2u^3.$$

Ainsi, dans le cas considéré, la fonction de forme a pour expression :

$$F(u) = (1 + 2l)u - (2l + l^2)u^2 + l^2u^3. \qquad (7)$$

Les formes dérivées du grain en lamelle sont :
la forme cubique ;
la forme sphérique ;
la forme irrégulière.

Lorsque le grain est cubique ou sphérique, le rapport l vaut l'unité, et dès lors :

$$F(u) = 3u - 3u^2 + u^3. \qquad (8)$$

Nous pouvons ramener la forme irrégulière à la forme sphérique, en procédant comme suit :

Soient : Z le rayon d'un grain sphérique fictif, que nous substituons, en vue du calcul, à chacun des grains irréguliers ;

N le nombre de grains contenus dans l'unité de poids de poudre ;

d la densité réelle de la poudre, c'est-à-dire, le rapport $\frac{1}{\gamma}$ *(n° 13)*.

Nous obtiendrons le rayon Z du grain par la relation :

$$N \,.\, d \,.\, \frac{4\pi Z^3}{3} = 1.$$

38. En opérant d'une manière analogue à celle indiquée dans le cas du grain en lamelle, nous obtenons, pour le parallélépipède allongé, c'est-à-dire, pour la forme en *bandelette*, la relation :

$$F(u) = (2 + l)u - (1 + 2l)u^2 + lu^3. \qquad (9)$$

La forme dérivée est le cylindre ou la corde ; elle a la même fonction de forme.

39. Enfin, nous trouvons pour le grain tubulaire :

$$F(u) = (1 + l)u - lu^2, \qquad (10)$$

en observant (fig. 5), que

$$l = \frac{2Z}{R - r}.$$

En diminuant la hauteur et en remplaçant la circonférence

extérieure de la base du grain tubulaire par un hexagone régulier circonscrit, on aura le grain prismatique à canal central.

On peut, sans erreur sensible, adopter la relation (10) comme fonction de forme de ce grain.

40. Propriétés de la fonction F (u) relative aux charges grenées. — Quelle que soit la forme du grain, la fonction $F(u)$ a pour expression générale :

$$F(u) = a_1 u - a_2 u^2 + a_3 u^3, \qquad (11)$$

les valeurs des paramètres a_1, a_2 et a_3 étant données par le tableau suivant :

Forme du grain.	a_1	a_2	a_3
Grain en lamelle.	$1 + 2l$	$2l + l^2$	l^2
Grain cubique et grain irrégulier.	3	3	1
Grain en languette et grain en corde.	$2 + l$	$1 + 2l$	l
Grain tubulaire et grain prismatique avec canal central.	$1 + l$	l	o

Les propriétés de la fonction $F(u)$, dont nous aurons à tirer parti ultérieurement, peuvent se résumer comme suit :

1° Cette fonction est continue ; elle s'annule pour $u = 0$; elle devient égale à l'unité pour $u = 1$.

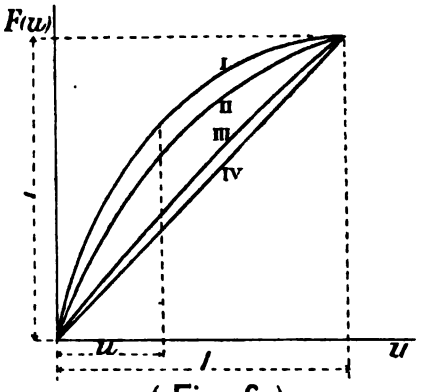
2° Les paramètres de cette fonction conservent les mêmes valeurs pour des grains géométriquement semblables.

3° Sa dérivée première est toujours positive ; sa dérivée seconde est constamment négative.

Toutes ces propriétés s'établissent avec la plus grande facilité à l'aide de la relation (11).

41. Comparaison des formes des grains. — Comburons successivement dans la même chambre des charges d'un poids donné, composées de grains de même épaisseur mais différant par la forme, et représentons, pour chacune de ces charges, le diagramme de la fonction $F(u)$.

A cet effet, portons sur un système d'axes rectangulaires, respectivement comme abscisses et ordonnées, les valeurs de u et de $F(u)$, en envisageant les quatre formes les plus usuelles (fig. 6).



(Fig. 6)

Forme irrégulière : tracé I. Forme lamellaire, $l = \frac{1}{10}$: tracé III.

Forme en languette, $l = \frac{1}{100}$: tracé II. Forme tubulaire, $l = \frac{1}{100}$: tracé IV.

L'examen de la figure permet de dire que, pour une valeur donnée de u, comprise entre 0 et 1, la plus petite valeur de $F(u)$, et par suite de la pression, s'obtient en comburant la charge à grains tubulaires.

Cette propriété de la forme du grain sera mise à profit dans le tir des armes à feu.

42. Propriétés de la fonction M (u). — Afin de nous préparer à l'étude de certaines théories développées plus loin, nous examinerons dès à présent les propriétés d'une autre fonction de la forme du grain, définie par la relation :

$$M(u) = \int_0^u \frac{u}{F(u)}\, du.$$

En remplaçant $F(u)$ par sa valeur, nous avons :

$$M(u) = \int_0^u \frac{u}{a_3 u^3 - a_2 u^2 + a_1 u}\, du = \int_0^u \frac{1}{a_3 u^2 - a_2 u + a_1}\, du,$$

et l'on sait que le résultat donné par cette intégrale dépend de la nature des racines de l'équation :

$$a_3 u^2 - a_2 u + a_1 = 0. \qquad (12)$$

Si l'on forme le réalisant et si l'on tient compte de la signification des paramètres a_1, a_2 et a_3, on constate que les racines de cette équation sont imaginaires, lorsqu'on envisage la forme en lamelle et toutes ses formes dérivées ; les racines sont réelles dans tous les autres cas (*).

(*) Parce qu'on a :

$$l < \frac{1}{4}.$$

43. Lorsque les racines sont imaginaires, on obtient par intégration :

$$M(u) = \frac{1}{a_3 \beta}\left[arctg\ \frac{\beta}{\beta_1} - arctg\ \frac{\beta - u}{\beta_1}\right], \qquad (13)$$

les paramètres β et β_1 étant donnés par les relations :

$$\begin{cases} \beta = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2}{l}\right), \\ \beta_1 = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{4}{l} - 1}, \end{cases}$$

qui conviennent à la forme lamellaire.

Pour $l = 1$, on déduit de là, les formules suivantes :

$$\begin{cases} \beta = \frac{3}{2}, \\ \beta_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}, \end{cases}$$

applicables aux formes sphériques, cubiques ou irrégulières.

Exemple. — Considérons la poudre sans fumée en lamelles, dite poudre L^3 *4-5*, à l'essai en Belgique.

Nous aurons pour cette poudre :

$$l = \frac{7}{50},$$

$$a_3 = 0{,}0196,$$

et aussi :

$$\beta = 7{,}64,$$

$$\beta_1 = 2{,}62,$$

et enfin :

$$M(u) = 19{,}43\left[arctg.\ 2{,}916 - arc\ tg.\left(\frac{7{,}64 - u}{2{,}62}\right)\right].$$

Pour $u = 1$, il vient :

$$M(1) = 0{,}9967.$$

44. Si les racines α' et α'' de l'équation (12) sont réelles, l'intégrale peut se mettre sous la forme :

$$M(u) = \frac{1}{a_3} \int_0^u \frac{1}{(u - \alpha')(u - \alpha'')} du,$$

ce qui conduit à :

$$M(u) = \frac{1}{a_3(\alpha' - \alpha'')} \left[\int_0^u \frac{1}{u - \alpha'} du - \int_u^0 \frac{1}{u - \alpha''} du \right],$$

et si l'on effectue les opérations, on obtient :

$$M(u) = \frac{1}{a_3(\alpha' - \alpha'')} \log_e \frac{\alpha''(u - \alpha')}{\alpha'(u - \alpha'')}.$$

En passant alors des logarithmes népériens aux logarithmes décimaux, on trouve finalement :

$$M(u) = \frac{1}{0{,}43 \,.\, a_3(\alpha' - \alpha'')} \log \frac{\alpha''(u - \alpha')}{\alpha'(u - \alpha'')}. \qquad (14)$$

Cette formule convient aux grains en bandelettes et en cordes.

45. Pour le grain tubulaire et sa forme dérivée, on a :

$$M(u) = \frac{1}{0{,}43\, a_2} \log \frac{1}{1 - \frac{a_2}{a_1} u}. \qquad (15)$$

Exemple. Grain prismatique avec canal central.

Données :

$$2R = 34^{mm}6,$$

$$2r = 9^{mm}6,$$

$$2Z = 12^{mm}5,$$

$$l = \frac{1}{2}.$$

On en déduit :

$$a_2 = \frac{1}{2},$$

$$a_4 = \frac{3}{2},$$

et aussi :

$$M(u) = 4{,}65 \log \frac{3}{3-u}.$$

46. Nous pouvons énoncer maintenant les propriétés principales de la fonction $M(u)$, comme suit :

1° La fonction $M(u)$ est continue ; elle s'annule pour $u = o$; pour $u = 1$, elle prend la valeur $M(1)$, variable avec la forme du grain.

2° Les paramètres de cette fonction conservent les mêmes valeurs pour des grains géométriquement semblables.

3° Sa dérivée première

$$M'(u) = \frac{u}{F(u)},$$

et sa dérivée seconde

$$M''(u) = \frac{F(u) - uF'(u)}{[F(u)]^2},$$

sont toujours positives.

47. Tables des fonctions de forme. — En vue de faciliter les calculs, dans les applications numériques, on pourra construire des tables donnant les valeurs des fonctions $F(u)$ et $M(u)$.

Nous avons établi ces tables, pour les poudres à grains irréguliers et pour les poudres à grains prismatiques, en usage dans notre pays *(nos 209 et 211)*.

§ 6.

Pressions en vase clos, pendant la combustion de la charge.

48. Hypothèse sur la loi des pressions, pendant la combustion de la charge et la détente des gaz. — Lorsque la charge se combure dans une capacité à volume constant ou à volume variable, les gaz se trouvent dans un état tumultueux, bien différent de l'état stationnaire, envisagé au *n° 20*.

On admet cependant que les relations établies pour ce dernier état, sont encore applicables au premier.

L'expérience n'infirme point cette hypothèse.

Pour s'assurer si la tension des gaz est constante en tous les points d'une même capacité, on a placé des enregistreurs de pression dans la culasse d'une arme à feu et dans le culot de son projectile, et l'on n'a constaté, après le tir, que des différences insignifiantes dans les pressions mesurées (*).

49. Pression en vase clos, à un instant quelconque de la combustion de la charge. Partant de l'hypothèse énoncée plus haut, nous allons exprimer la pression en vase clos, à un instant quelconque de la combustion d'une charge.

Soient :

V le volume de la chambre ;

U_0 l'énergie spécifique de l'explosif ;

(*) Voici ce que dit à ce sujet le chef d'escadron Vallier, dans sa « Balistique des nouvelles poudres ».

M. Zaboudski a constaté, dans des tirs où le culot du projectile était muni d'un enregistreur de pression ainsi que la culasse, que la différence entre les deux enregistrements étaient de l'ordre des variations expérimentales.

On sait du reste que si l'on dispose dans une culasse deux appareils crushers, identiques en apparence, on constate cependant entre eux des désaccords, provenant de nuances inappréciables dans leur fonctionnement.

η son covolume ;

Q le poids de la charge ;

Q' le poids d'explosif comburé, à l'heure t ;

p la pression des gaz par unité de surface, en ce moment.

Le volume réduit de la chambre étant égal à

$$V - \eta Q,$$

pendant toute la durée de la combustion de la charge, et l'énergie totale des gaz, à l'heure t, étant exprimée par

$$U_0 Q',$$

l'application de la formule (6) conduit à l'expression :

$$p = \frac{KU_0Q'}{V - \eta Q}. \qquad (16)$$

En faisant alors :

$$Q' = Q,$$

la pression p devient égale à la *pression maximum* P, donnée par la relation :

$$P = \frac{KU_0\ Q}{V - \eta Q}. \qquad (17)$$

D'ailleurs, si $F(u)$ est la valeur correspondante de Q' dans la formule (16), il vient :

$$p = \frac{KU_0Q}{V - \eta Q} F(u),$$

et aussi :

$$p = PF(u), \qquad (18)$$

relation qui indique de quelle manière la fonction $F(u)$ influe sur la pression en vase clos *(n° 41)*.

50. Pression maximum des gaz en fonction de la densité de chargement. — Mettons l'expression (17) sous la forme :

$$P = \frac{KU_0 \frac{Q}{V}}{1 - \eta \frac{Q}{V}},$$

et posons :

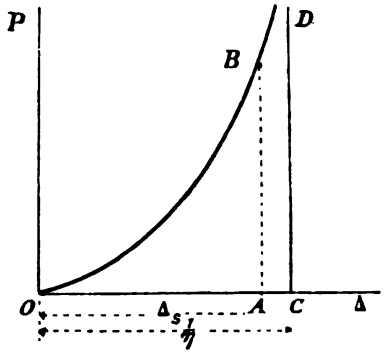
$$\frac{Q}{V} = \Delta,$$

nous obtenons ainsi :

$$P = \frac{KU_0\Delta}{1 - \eta\Delta}; \qquad (19)$$

le rapport Δ se nomme la *densité de changement.*

Supposons maintenant que V reste constant et faisons croitre le poids Q d'une manière continue ; les quantités Δ et P subissent alors des variations correspondantes, que nous pouvons représenter par un diagramme.



(Fig. 7)

En considérant Δ comme l'abscisse et P comme l'ordonnée d'une courbe rapportée à deux axes rectangulaires, nous obtenons une

branche d'hyperbole ayant pour asymptote la droite CD, menée parallèlement à l'axe OP, à la distance

$$OC = \frac{1}{\eta}. \qquad \text{(fig. 7)}$$

51. Force spécifique et module de chargement d'un explosif. — Nous nommons *module de chargement* le rapport du poids de la charge au volume réduit de la chambre.

En désignant ce module par δ, nous avons :

$$\delta = \frac{Q}{V - \eta Q} = \frac{\Delta}{1 - \eta\Delta}. \qquad (20)$$

Nous appelons *force spécifique de l'explosif*, la pression par unité de surface correspondant à un module de chargement égal à l'unité.

On voit d'ailleurs que $\delta = 1$, quand on suppose :

$$Q = 1 \qquad \text{et} \qquad V - \eta Q = 1\,;$$

ou encore :

$$\Delta = \frac{1}{1 + \eta}.$$

Représentons par f la force spécifique de l'explosif et introduisons la condition $\delta = 1$, dans la relation (17), il vient alors :

$$f = KU_0\,, \qquad (21)$$

ce qui nous permet d'écrire :

$$P = f\frac{\Delta}{1 - \eta\Delta} = f\delta. \qquad (22)$$

52. Force absolue d'un explosif. — Désignons respectivement par Δ_s et δ_s le maximum de la densité de chargement et du module de chargement.

En vertu de ce qui a été dit au *n° 12*, nous aurons :

$$\Delta_s = \frac{1}{\beta + r_1},$$

et

$$\delta_s = \frac{\Delta_s}{1 - r_1 \Delta_s}.$$

Nous nommerons *force absolue* de l'explosif, la pression par unité de surface qui correspond au maximum δ_s du module de chargement ; cette pression F est exprimée par la relation :

$$F = f\delta_s. \qquad (23)$$

53. Densité gravimétrique. — On appelle *densité gravimétrique* d'un explosif, le poids D de substance explosive qui remplit une capacité ayant un volume égal à l'unité et une forme choisie. *(n° 62.)*

Quand la chambre a un volume V et une forme quelconque, on admet dans la pratique que le poids maximum de substance qu'elle peut contenir, sans empêcher l'amorçage et la gazéification de la charge, est ;

$$V D,$$

et alors le maximum de la densité de chargement est :

$$\frac{V D}{V} = D.$$

Ainsi, dans les applications, on pose :

$$\Delta_n = D,$$

ce qui permet de calculer la quantité β.

En effet, on a :

$$\frac{1}{\beta + \gamma_1} = D,$$

d'où :

$$\beta = \frac{1}{D} - \gamma_1.$$

§ 7.

Pressions des gaz pendant la détente.

54. Imaginons que des gaz se détendent en poussant un piston P, dans un cylindre AA' de section transversale S, fermé à l'une de ses extrémités par un tampon T, et cherchons la loi suivant laquelle varie la pression sur ce piston en fonction du volume occupé par les gaz. (fig. 8.)

(Fig. 8)

Si nous supposons le cylindre indéformable et imperméable à la chaleur, l'énergie perdue par les gaz sera, à chaque instant, équivalente au travail exécuté.

Cela étant, soient à l'heure 0, c'est-à-dire, au moment où commence la détente des gaz :

$CDEF$ la position du piston ;
V_0 le volume occupé par les gaz ;
QU_0 leur énergie totale ;
p_0 la pression en un point de la face CD ;
x_0 la distance de cette face à la paroi AB ;

et soient aussi, pour l'heure t : $C'D'E'F'$ la position du piston ;
V le volume occupé par les gaz ;
QU leur énergie totale ;
p la pression en un point de la face $C'D'$;
x la distance de cette face à la paroi AB.

L'énergie perdue par les gaz, lorsque le piston parcourt le chemin $x - x_0$, est :

$$Q\,(U_0 - U),$$

et le travail correspondant a pour expression :

$$\int_{x_0}^{x} Sp\,dx \text{ ou } \int_{V_0}^{V} p\,dV,$$

puisque :

$$S_{x_0} = V_0 \quad \text{et} \quad S_x = V.$$

On peut donc écrire :

$$Q\,(U_0 - U) = \int_{V_0}^{V} p\,dV,$$

et en dérivant par rapport à V, on obtient :

$$-Q\frac{dU}{dV} = p. \tag{24}$$

Mais en vertu de l'hypothèse faite au *n° 48*, on a aussi :

$$p = \frac{KUQ}{V - \eta Q}, \tag{25}$$

et en prenant la dérivée de cette expression par rapport à V, on trouve :

$$\frac{dp}{dV} = \frac{KQ}{V - \eta Q} \cdot \frac{dU}{dV} - \frac{KUQ}{(V - \eta Q)^2}. \tag{26}$$

Lorsqu'on élimine les quantités U et $\frac{dU}{dV}$, entre les relations (24), (25) et (26), on obtient :

$$\frac{dp}{dV} = -\frac{p}{V - \gamma_1 Q} \cdot (K + 1).$$

Si l'on intègre cette équation, entre les limites V et V_0, il vient :

$$\log_e \frac{p}{p_0} = (K + 1) \log_e \left(\frac{V_0 - \gamma_1 Q}{V - \gamma_1 Q}\right),$$

et, en passant des logarithmes aux nombres, on arrive à la formule :

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{V_0 - \gamma_1 Q}{V - \gamma_1 Q}\right)^{K+1}.$$

Si l'on pose :

$$K + 1 = n,$$

on peut écrire alors, en définitive :

$$p = p_0 \left(\frac{V_0 - \gamma_1 Q}{V - \gamma_1 Q}\right)^n. \qquad (27)$$

55. Pour calculer la pression p en un point de la capacité V, lorsque la détente des gaz s'opère pendant la combustion de la charge, nous séparerons les deux phénomènes, par la pensée.

Cela étant, soient :

Q' le poids des gaz occupant le volume V ;

p' la pression qu'on obtiendrait si ces gaz se formaient dans le volume V_0 ;

p'' la pression à laquelle se réduirait p', par la détente.

En vertu des relations (16) et (27), nous obtiendrons :

$$p' = \frac{KU_0Q'}{V - \gamma_1 Q}$$

et

$$p'' = p'\left(\frac{V_0 - \gamma_1 Q}{V - \gamma_1 Q}\right)^n;$$

nous admettrons d'ailleurs, comme résultat d'expérience *(5° du n° 166)*, que :

$$p'' = p.$$

Mais nous avons :

$$KU_0 = f \quad \text{et} \quad Q' = QF(u),$$

ce qui nous permet d'écrire :

$$p = \frac{fQ}{V_0 - \gamma_1 Q}\left(\frac{V_0 - \gamma_1 Q}{V - \gamma_1 Q}\right)^n F(u). \tag{28}$$

C'est sur cette expression générale que nous nous appuierons, pour déterminer la pression des gaz en un point de l'âme d'une arme à feu.

§ 8.

De la vivacité d'un explosif.

56. Définition de la vitesse de combustion. — Supposons que l'on ait provoqué la combustion d'une masse explosive, et désignons respectivement par z et $z + \Delta z$ les épaisseurs des couches brûlées, aux heures t et $t + \Delta t$.

Nous nommerons *vitesse moyenne de combustion* pendant le temps Δt, le rapport $\frac{\Delta z}{\Delta t}$, et *vitesse de combustion* à l'heure t, la limite $\frac{dz}{dt}$ vers laquelle converge ce rapport lorsque Δt tend vers zéro.

Nous prendrons $\frac{dz}{dt}$ comme *mesure de la vivacité de l'explosif*, à l'heure t.

57. Loi relative à la vitesse de combustion. — Puisque la propagation des réactions chimiques est due, essentiellement, à la quantité de chaleur des gaz formés, et que la pression croit avec cette quantité de chaleur, on est conduit à dire que la vitesse de combustion augmente avec la pression.

Dans un travail remarquable, intitulé « Etude des effets de la poudre dans un canon de 10c » MM. Sebert et Hugoniot ont établi expérimentalement que la vitesse de combustion croit proportionnellement à la pression.

Cela nous conduit à poser :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\varphi}{f} p, \tag{29}$$

φ étant un coefficient que nous nommerons *vitesse spécifique de combustion*.

Il représente la vitesse de combustion correspondant à une pression

égale à la force spécifique de l'explosif ; on constate qu'il varie avec la nature de l'explosif et le coefficient d'inflammation.

58. Quand on amorce deux charges identiques de poudre noire, d'une part avec une amorce fusante, et d'autre part avec une amorce détonante, on trouve expérimentalement, pour la vitesse spécifique de combustion :

$$1{,}8\ m - s\ .\ \text{(amorce fusante)}$$
$$680\ m - s\ .\ \text{(amorce détonante)}$$

Le coefficient d'inflammation a donc une influence énorme sur la vitesse spécifique de combustion (*).

59. Par la pensée, faisons varier le coefficient d'inflammation et désignons par φ_s la limite supérieure de la vitesse spécifique de combustion, pour un explosif déterminé ; on admet que cette limite est atteinte, quand on met en œuvre le fulminate de mercure.

60. Vitesse absolue de combustion d'un explosif. — Nous appellerons *vitesse absolue de combustion* d'un explosif, la limite supérieure de la vitesse de combustion (**).

Nous aurons cette limite Φ, en remplaçant p par F et φ par φ_s, dans la relation (29), ce qui donnera :

$$\Phi = \frac{\varphi_s}{f} F,$$

et comme :

$$F = f\delta_s,$$

nous obtiendrons, en définitive :

$$\Phi = \varphi_s \delta_s. \qquad (30)$$

(*) Pour interpréter le rôle considérable de l'amorce, certains auteurs ont imaginé des combustions de divers ordres.

(**) On la nomme aussi vitesse de détonation.

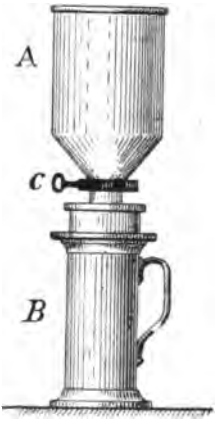
§ 9.

Marche à suivre pour déterminer expérimentalement les caractéristiques des explosifs.

61. Les divers explosifs se distinguent par des constantes, savoir :
la densité gravimétrique, D ;
la force spécifique, f ;
le covolume, η ;
la vitesse spécifique de la combustion, φ ;
l'énergie spécifique, U_0 ;
la chaleur de combustion, C_0 ;
la température absolue de combustion, T_0 ;
nous nommerons ces constantes les caractéristiques des explosifs.

Bien que toutes les caractéristiques soient susceptibles d'une détermination expérimentale, nous n'indiquerons que la marche à suivre pour obtenir les quantités D, f, η et φ, intervenant d'une manière directe dans la mesure des effets des explosifs.

62. Mesure de la densité gravimétrique. — La détermination de la densité gravimétrique se fait avec un *gravimètre* (fig. 9).



(Fig 9)

C'est un récipient cylindrique B, mesurant un litre, sur lequel on adapte un entonnoir A d'une capacité plus grande, et dont l'ouverture inférieure se ferme par un obturateur mobile C.

L'entonnoir étant rempli d'explosif, on ouvre l'obturateur et la matière s'écoule dans le vase B, en s'y disposant d'une manière assez régulière ; en effet, si l'on recommence plusieurs fois l'opération, on

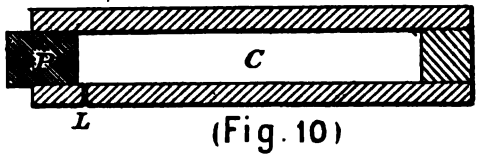
constate que le tassement éprouvé par la substance explosive, reste à peu près le même.

Le vase B étant plein, on ferme l'obturateur, on enlève l'entonnoir et l'on arase la partie supérieure du cylindre B avec une raclette.

On pèse le vase rempli, et connaissant d'avance le poids du vase vide, on a, par différence, le poids d'un décimètre cube d'explosif ; c'est la densité gravimétrique.

63. Mesure des caractéristiques f, η et φ. — Pour déterminer les caractéristiques f, η et φ, on peut procéder comme suit :

On met la charge dans la chambre cylindrique C de l'appareil de mesure (fig. 10) ; on amorce cette charge par la lumière L, ce qui provoque l'action des gaz sur le piston P, d'un dispositif enregistrant la pression en fonction du temps *(n° 208)*.



(Fig. 10)

Soient : Q le poids de la charge ;
V le volume de la chambre ;
Δ la densité de chargement, calculée ;
P la pression maximum des gaz, mesurée.

Cela étant, on introduit les quantités Δ et P dans l'expression :

$$P = \frac{f\Delta}{1 - \eta\Delta}$$

et l'on a ainsi une première relation, contenant deux quantités inconnues f et η.

S'il ne fallait point tenir compte des erreurs d'observation, il suffirait, pour calculer ces inconnues, de faire une deuxième expérience, avec une autre charge de même substance explosive.

Quand on veut corriger les résultats, on procède à un grand nombre d'essais, et l'on évalue alors les quantités f et η, par un procédé graphique ou par la méthode des moindres carrés.

Supposons maintenant qu'on veuille mesurer la vitesse spécifique de combustion, et pour fixer les idées, admettons qu'on ait amorcé avec un détonateur une charge compacte cylindrique.

Soient alors : Z la longueur de la charge ;
T sa durée de combustion ;
P la pression maximum des gaz ;
δ le module de chargement.

Les quantités Z, T et P étant mesurées, et le module de chargement δ étant calculé, on déduira la vitesse spécifique de combustion φ_s, de la relation :

$$\frac{Z}{\varphi_s \delta} \log_e \frac{P}{103,33} = T,$$

établie plus loin *(n° 67)*.

On procédera à plusieurs essais, en faisant varier la quantité Z.

64. Des pertes de chaleur. — Dans les théories exposées antérieurement, nous avons fait abstraction de la chaleur perdue par les gaz, à travers les parois de leur enveloppe.

Pour tenir compte, dans une certaine mesure, du refroidissement de ces gaz, pendant la durée de combustion de la charge, on n'admettra, dans les applications, que les valeurs des caractéristiques provenant d'expériences ; on écartera les résultats déduits des équations chimiques, puisque ceux-ci font abstraction de la déperdition calorifique.

Ces expériences seront conduites comme nous venons de le dire, ou bien, comme nous l'expliquerons plus tard *(n° 196)*.

Le tableau suivant donne les valeurs numériques à employer dans la pratique.

65. Caractéristiques des explosifs.

DÉSIGNATION DE L'EXPLOSIF.	f. Force spécifique. $\delta = 1$. kil. — déc.²	η. Covolume. déc.³	D. Densité gravimétrique kil. — déc.³	φ. Vitesse spécifique de combustion, avec amorce fusante. déc. — sec.	φ_s. Vitesse spécifique de combustion, avec amorce détonante déc. — sec.	Observations
Poudre noire	261.500	0,600	0,850	18,22	6801	
Poudre brune de Wetteren	273.600	0,570		32,79		Poudre belge.
Poudre L³ de Wetteren.	990.133	0,676		10,92		»
Blättchenpulver. (Poudre en lamelles.) . .	780.000	0,920				Poudre allemande.
Würfelpulver. (Poudre en dés.)	910.000	0,840				»
Balistite	905.200	0,774				Poudre italienne.
Cordite	1.040.000	0,774				Poudre anglaise.
Fulminate de mercure .	436.700	0,310	3,150		2321	
Acide picrique. . . .	324.260	0,864	1,000		11040	
Tonite de Wetteren . .	307.580	0,681	1,400		1347	
Dynamite ordinaire à 75 %	321.645	0,712	1,300		2817	
Dynamite gomme . .	355.640	0,712	1,300		8602	
Coton-poudre sec. . .	350.410	0,859	0,900		9702	
Coton-poudre à 20 % d'eau	287.650	0,924	0,900		11290	

§ 10.

Applications numériques.

66. Dans les calculs suivants, les unités fondamentales admises sont le kilogramme, le décimètre et la seconde.

I. On donne :

la force spécifique de la poudre noire, $f = 261500$;
le covolume de cette poudre, $\eta = 0,600$;
le poids de la charge, $Q = 2,000$;
le volume de la chambre, $V = 4,500$.

On demande :

la densité de chargement, le module de chargement et la pression maximum des gaz ?

On a :

$$\Delta = \frac{Q}{V} = \frac{2.000}{4,500} = 0,444.$$

$$\delta = \frac{\Delta}{1 - \eta\,\Delta} = \frac{0.444}{1 - 0,600\ .\ 0,444} = 0,605.$$

$$P = f\delta = 261500\ .\ 0,605 = 158207.$$

II. On donne :

la force spécifique de la tonite de Wetteren ; $f = 307580$;
le covolume de l'explosif ; $\eta = 0,681$;
la densité gravimétrique ; $D = 1,400$.

On demande :

la force absolue de l'explosif ?

On part de la relation :

$$\delta_s = \frac{D}{1 - \eta D} = \frac{1.400}{1 - 0,681\ .\ 1,400} = 30,043\ ;$$

ce qui conduit à :

$$F = f\delta_s = 307580 \ . \ 30{,}043 = 9240626.$$

III. On donne, pour la poudre noire :

la vitesse spécifique de combustion, avec amorce détonante, $\varphi_s = 6801$;
la densité gravimétrique, $D = 0{,}850$;
le covolume, $\eta = 0{,}600$.

On demande :

la vitesse absolue de combustion de cette poudre ?

On trouve :

$$\delta_s = \frac{D}{1 - \eta D} = \frac{0{,}850}{1 - 0{,}600 \ . \ 0{,}850} = 1{,}735,$$

ce qui donne :

$$\Phi = \varphi_s \, \delta_s = 6801 \ . \ 1{,}735 = 11800, \text{ ou } (1180 \ m \ s.)$$

CHAPITRE II.

EFFETS DES EXPLOSIFS SUR LES PAROIS DES PROJECTILES.

---

§. 1.

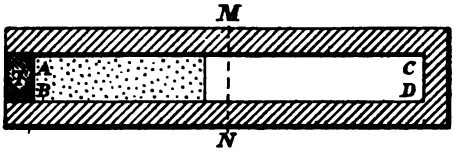
Relation entre la pression et le temps, la charge se comburant dans une capacité fermée.

67. Nous avons établi la relation entre la pression et les caractéristiques de l'explosif, en considérant, pour simplifier les idées, une chambre inextensible.

Si nous envisageons maintenant le cas d'une enveloppe déformable, les gaz pourront provoquer la rupture et la projection des parois de cette enveloppe.

Ces effets de l'explosion dépendent de la loi de succession des pressions en fonction du temps.

Afin de déterminer cette loi, plaçons une charge compacte dans une chambre métallique *ABCD*, de forme cylindrique, obturée par



(Fig. 11)

un tampon *T*, et admettons qu'une amorce détonante donne pour surface d'inflammation le cercle *AB* (fig. 11).

Soient alors : Q_m la *charge minimum de rupture*, c'est-à-dire le poids d'explosif nécessaire et suffisant pour amener l'explosion du cylindre ;

Q la charge mise en œuvre, moindre que Q_m ;

Q' le poids d'explosif comburé, à l'heure t ;

T la durée de la combustion complète.

Nous avons obtenu les relations :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\varphi_s}{f} p, \tag{31}$$

$$p = P\,F(u) = P \,.\, u = P\,\frac{z}{Z};$$

et, en dérivant cette dernière expression par rapport au temps, il vient aussi :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{P}{Z}\,\frac{dz}{dt}. \tag{32}$$

Si nous éliminons maintenant la quantité $\frac{dz}{dt}$ entre les équations (31) et (32), nous trouvons :

$$\frac{\varphi_s}{f}\,p = \frac{Z}{P}\,\frac{dp}{dt}.$$

Admettons que l'heure 0 désigne l'instant initial de la combustion, auquel correspond une pression égale à celle de l'atmosphère, puis exprimons les pressions en kilogrammes par décimètre carré ; nous arrivons alors, par intégration, à la formule que voici :

$$\frac{\varphi_s}{f}\,t = \frac{Z}{P}\,log_e\,\frac{p}{103{,}33},$$

ou, en remplaçant P par $f\delta$:

$$t = \frac{Z}{\varphi_s\,\delta}\,log_e\,\frac{p}{103{,}33}. \tag{33}$$

A la fin de la combustion :

$$t = T \quad \text{et} \quad p = P,$$

ce qui donne :

$$T = \frac{Z}{\varphi_s \delta} \log_e \frac{P}{103,33}.$$

68. Influence de l'amorce sur la durée de combustion. — Lorsque la charge remplit entièrement la chambre, on a :

$$P = F \quad \text{et} \quad \delta = \delta_s,$$

et la durée de combustion devient :

$$T_1 = \frac{Z}{\varphi_s \delta_s} \log_e \frac{F}{103,33}.$$

Si l'inflammation s'obtient par l'intervention de l'amorce fusante, on trouve :

$$T_2 = \frac{Z}{\varphi \delta_s} \log_e \frac{F}{103,33},$$

et dès lors, le rapport des durées s'exprime par la relation :

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\varphi}{\varphi_s},$$

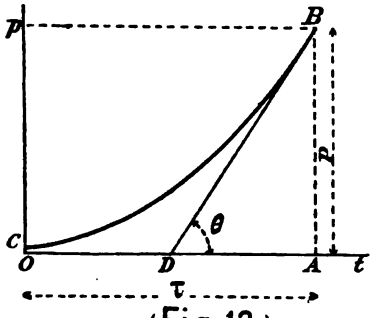
laquelle met en évidence l'influence du choix de l'amorce sur la durée de combustion.

S'agit-il, par exemple, de la poudre noire ?

Le tableau du *n° 65*, nous permettra de poser :

$$\frac{\varphi}{\varphi_s} = \frac{18,22}{6801} = \frac{1}{373}.$$

69. Diagramme des pressions en fonction du temps. — Prenons deux axes rectangulaires *ot* et *op*, et représentons la relation (33) par un diagramme (fig. 12).



(Fig. 12)

Ce diagramme a été tracé en supposant :

$$OA = T;$$
$$AB = P;$$
$$OC = 103{,}33 \quad K - d^2;$$

et si l'on tient compte des relations (31) et (32), on obtient, pour expression du coefficient angulaire de la tangente BD au point B :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{dP}{dt} = \frac{f\delta}{Z}\frac{dZ}{dt} = \frac{f\varphi_x\delta^2}{Z}.$$

On a d'ailleurs :

$$aire\ OABC = \int_0^T p\,dt.$$

§ 2.

Mesures des effets.

70. De la rupture. — Supposons la fragmentation du cylindre *ABCD* (fig. 11), préparée en son milieu *MN*, par une diminution de l'épaisseur du métal en cet endroit. Pour obtenir la charge minimum de rupture de ce cylindre, sous l'action d'une substance explosive déterminée, on fera des essais successifs, en augmentant graduellement le poids de la charge, jusqu'au moment où l'on constatera la fragmentation.

71. Des expériences ont été faites, dans cet ordre d'idées, par MM. Roux et Sarrau. Ils ont déterminé les charges minima de rupture, pour quelques substances explosives, dont la combustion est provoquée, tantôt par une amorce fusante, tantôt par un détonateur.

Nous indiquons dans le tableau suivant les charges trouvées, ainsi que les rapports obtenus, en adoptant le poids de poudre noire comme unité.

NATURE DE L'EXPLOSIF.	Charge minimum de rupture, avec amorce fusante. Grammes.	Rapport obtenu en prenant la charge de poudre noire comme unité.	Charge minimum de rupture, avec amorce détonante. Grammes.	Rapport obtenu en prenant la charge de poudre noire comme unité.	Rapport obtenu en amorçant différemment un même explosif.
	a	$a : 13$	b	$b : 3$	$a : b$
Poudre noire . .	13	1	3	1	4,34
Nitroglycérine. .	2,7	0,21	1,3	0,43	2,08
Coton-poudre . .	4,3	0,33	2	0,66	2,15
Picrate de potasse.	7,2	0,56	2,4	0,80	3,00

De ces essais nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

1° La rupture de l'enveloppe soumise aux pressions s'obtient avec une charge moindre, lorsque la combustion est rendue plus vive, par la substitution d'un détonateur à une amorce fusante.

2° La pression maximum ne peut-être prise comme mesure de l'effet produit, puisque, d'une part, l'énergie spécifique des gaz est indépendante du choix de l'amorce *(n° 30)*, et que d'autre part, la charge minimum de rupture varie avec le mode d'excitation ; dès lors, le même effet peut correspondre à des pressions maxima différentes.

72. Guidé par les considérations précédentes, nous avons adopté, le produit de la pression maximum des gaz par la vitesse de combustion correspondante, c'est-à-dire, l'expression :

$$P \cdot \frac{\varphi_s P}{f} = P^2 \cdot \frac{\varphi_s}{f} = f\varphi_s \delta^2,$$

comme critérium ou indice de la puissance de rupture de la charge mise en œuvre, ou, plus brièvement, comme *indice de rupture de la charge*, et nous montrerons, par une application numérique *(n° 83)*, que nous obtenons ainsi la concordance du calcul et de l'expérience.

73. L'indice de rupture d'un explosif croît avec le module de chargement, or, δ_s est la limite supérieure de δ.

Le maximum de l'indice de rupture de l'explosif considéré est donc égal à :

$$f\varphi_s \delta_s^2 = F\Phi, \tag{34}$$

puisque :

$$f\delta_s = F \quad \text{et} \quad \varphi_s \delta_s = \Phi.$$

Par conséquent, le *maximum de l'indice de rupture d'une substance explosive croît proportionnellement à sa force et à sa vivacité absolues.*

74. Admettons qu'il faille provoquer la rupture d'un cylindre, et désignons par H une quantité dépendant de la nature du métal, de la forme et des dimensions de l'enveloppe donnée, quantité équivalente d'ailleurs au minimum de la valeur que doit atteindre l'indice de rupture de l'explosif, pour que la fragmentation puisse s'effectuer ; la constante H sera nommée *indice de résistance du cylindre.*

Nous supposerons cet indice connu ; on pourrait du reste le calculer, en s'appuyant sur des considérations relatives à la résistance des matériaux.

Cela étant, la fragmentation des parois se produira si l'indice de rupture de la charge employée satisfait à la condition :

$$f\varphi_s\delta^2 \geqq H.$$

et le module de chargement δ_m relatif à la charge minimum de rupture, se calculera par l'équation :

$$f\varphi_s\delta_m^2 = H.$$

Il est intéressant de connaitre la corrélation qui existe entre les éléments du diagramme représenté au *n° 69*, et la quantité H.

Quand on suppose ce tracé fait pour la charge minimum de rupture de l'explosif, on a :

$$Z\, tg\, \theta = f\varphi_s\delta_m^2 = H.$$

Ainsi, la longueur et le volume de la charge minimum diminuent lorsque $tg\, \theta$ augmente.

75. Imaginons qu'on ait déterminé, pour un certain explosif N, la charge minimum capable de provoquer la rupture d'un cylindre

d'indice de résistance H, et calculons le poids de la charge minimum à mettre en œuvre pour obtenir le même effet avec un autre explosif N' ?

Si nous désignons par :

$$f, \varphi_s, \delta_m \quad \text{et} \quad f', \varphi'_s, \delta'_m.$$

les éléments qui correspondent respectivement aux explosifs N et N', nous avons les relations :

$$f\varphi_s \delta_m^2 = f'\varphi'_s \delta'^2_m = H,$$

d'où nous déduisons :

$$\delta_m = \delta'_m \left(\frac{f'\varphi'_s}{f\varphi_s}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{35}$$

Lorsque le module δ_m aura été calculé par l'équation précédente, nous trouverons le poids Q_m de la charge demandée, à l'aide de la formule :

$$\delta_m = \frac{Q_m}{V - \eta Q_m}.$$

Quand on ne modifie que le mode d'excitation de la substance explosive, l'expression (35) devient :

$$\delta_m = \delta'_m \left(\frac{\varphi_s}{\varphi}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{36}$$

les quantités δ_m et φ se rapportant à l'amorce fusante.

76. De la projection. — Supposons que la fragmentation du cylindre soumis aux pressions ait été préparée de manière à former un certain nombre d'éclats identiques, et que le poids de la charge employée soit supérieur à Q_m.

Considérant alors que la quantité de mouvement acquise par l'un de ces éclats, à la fin de la combustion, est proportionnelle à l'impulsion communiquée par les gaz à l'unité de surface de l'enveloppe, nous avons adopté l'expression :

$$\int_0^T p dt,$$

comme mesure ou indice de la puissance de projection de la charge, ou, plus simplement, comme *indice de projection de la charge.*

Il est à remarquer que cet indice est proportionnel à l'aire $OABC$ (fig. 12).

Du reste, en partant de la formule :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\varphi}{f} p,$$

nous trouvons par intégration :

$$\int_0^T p dt = \frac{fZ}{\varphi}.$$

77. Proposons-nous maintenant de déterminer le maximum de l'indice de projection d'un explosif donné.

A cet effet, soient : D la densité gravimétrique de la substance explosive ;
η son covolume ;
V le volume de la chambre cylindrique ;
S l'aire de sa section transversale.

La limite supérieure de Z est donnée par la formule :

$$SZ = \eta . VD,$$

et par conséquent le maximum a pour expression :

$$\frac{fZ}{\varphi} = \frac{f\eta D}{\varphi} \cdot \frac{V}{S} = \frac{F\eta D}{\Phi} \cdot \frac{V}{S}. \qquad (37)$$

Ainsi, *le maximum de l'indice de projection croît en raison directe du produit $F\eta D$ et en raison inverse de Φ.*

78. Lorsqu'on fait agir deux explosifs quelconques N et N' sur des enveloppes cylindriques identiques, on aura, entre les poids Q et Q' des charges ayant même indice de projection, la relation suivante :

$$\frac{f\eta Q}{\varphi} = \frac{f'\eta' Q'}{\varphi'}, \tag{38}$$

puisque :

$$\frac{Z}{Z'} = \frac{\eta Q}{\eta' Q'}.$$

79. Résumé. — Nous avons déterminé l'influence des caractéristiques de l'explosif mis en œuvre, sur ses effets, en considérant, pour fixer les idées, la rupture d'un cylindre et la projection des éclats formés. Cela nous a permis de fixer les conditions du maximum d'action de l'explosif, et d'établir la relation qui doit exister entre des charges de substances différentes, pour provoquer le même effet.

Mais, bien d'autres questions peuvent être résolues relativement au choix des explosifs et à l'organisation des projectiles, en s'appuyant sur les considérations précédentes ; elles feront l'objet d'un autre cours. (*)

(*) Cours de balistique de pénétration.

§ 3.

Echelles des forces et des vivacités absolues.

80. Pour que les comparaisons puissent se faire facilement, et pour qu'il soit possible de choisir judicieusement les substances explosives, il est avantageux de les classer, d'après leur force et leur vivacité absolues.

81. En rangeant ces substances dans l'ordre décroissant des forces absolues, on aura, ce que nous appelons *l'échelle des forces absolues des explosifs*.

Dans le tableau suivant, nous donnons les résultats pour les substances les plus employées.

DÉSIGNATION DE L'EXPLOSIF.	Force spécifique. f. kil — déc.²	Maximum du module de chargement. δ_s. kil — déc.³	Force absolue. F. kil — déc².
Fulminate de mercure. . . .	436700	136,957	59 809 322
Tonite de Wetteren	307580	30,043	9 240 626
Dynamite gomme	355640	17,473	6 214 098
Dynamite ordinaire	321645	17,473	5 620 103
Acide picrique	324260	7,353	2 384 284
Coton-poudre humide comprimé à 20 °/₀ d'eau.	287650	5,344	1 537 202
Coton-poudre sec	350410	3,966	1 389 726
Poudre noire	261500	1,735	453 702

82. En opérant de même sur les vitesses absolues de combustion, on obtiendra l'*échelle des vivacités absolues :*

DÉSIGNATION DE L'EXPLOSIF.	Vitesse spécifique de combustion, avec amorce détonante. φ_s. déc — sec	Maximum du module de chargement. δ_s. kil — déc²	Vitesse absolue de combustion. Φ. déc — sec
Fulminate de mercure . . .	2321	136.957	317877
Dynamite-gomme	8602	17,473	150303
Acide picrique	11040	7,353	81177
Coton-poudre humide comprimé à 20 % d'eau.	11290	5,344	60334
Dynamite ordinaire à 75 % . .	2817	17,473	49221
Coton-poudre sec	12410	3,966	49218
Tonite de Wetteren	1347	29,787	40123
Poudre noire	6801	1,735	11800

Il est à remarquer que le fulminate de mercure occupe le premier rang dans chacune de ces échelles.

Les qualités de cette substance, comme détonateur, sont dues principalement à la grande densité gravimétrique de ce corps (D = 3,150).

83. *Application numérique.* — Les unités fondamentales employées dans le calcul suivant, sont : le kilogramme, le décimètre et la seconde.

1. On donne :

le volume de la chambre, $V = 0,01$;

le covolume de la poudre noire, $\eta = 0,6$;

le poids de poudre nécessaire pour provoquer la rupture d'un cylindre, quand on emploie une amorce détonante, 0,003.

On demande :

de calculer la charge minimum à mettre en œuvre pour obtenir la rupture, dans le cas où l'excitation se fait avec une amorce fusante ?

Pour résoudre la question il faut appliquer la formule (36) ; or, nous avons obtenu au *n° 68* :

$$\frac{\varphi_s}{\varphi} = 373,$$

et par conséquent :

$$\left(\frac{\varphi_s}{\varphi}\right)^{\frac{1}{2}} = 19,31.$$

Cela nous permet d'écrire la formule :

$$\frac{Q_m}{0,01 - 0,6.\ Q_m} = \frac{0,003}{0,01 - 0,6\ .\ 0,003} = 19,31,$$

d'où nous déduisons :

$$Q_m = \frac{0,5793}{42,958} = 0,013.$$

C'est le résultat obtenu expérimentalement, par MM. Roux et Sarrau *(n° 71)*.

CHAPITRE III.

DU CHOIX DES EXPLOSIFS DE RUPTURE.

---

§ 1.

Inconvénients que présente la poudre noire, au point de vue du chargement des projectiles.

84. La poudre noire, la seule dont on faisait usage autrefois pour le chargement des projectiles creux, présente de sérieux inconvénients qu'une longue pratique a mis en évidence.

L'humidité, le contact prolongé des parois métalliques, altèrent profondément les qualités explosives de ce mélange. Pour ces raisons, on ne peut conserver les projectiles chargés que dans des magasins bien secs, et encore faut-il enduire les parois intérieures des projectiles d'une couche protectrice de peinture ou de vernis.

85. Cette poudre est sujette à l'enrochement, c'est-à-dire, qu'elle se transforme par le tassement, durant le trajet du projectile dans l'âme, en une masse compacte que le ciseau n'entame qu'avec peine

L'enrochement rend l'amorçage difficile, il anéantit toutes les dispositions prises pour assurer aux grains une forme et des dimensions déterminées ; il modifie le mode de rupture comme l'indique le tableau suivant.

Eclats donnés par 8 obus en fonte, avec une charge de 300 grammes de poudre noire.

Conditions dans lesquelles ont été faites les expériences.	Petits éclats.	Moyens éclats.	Gros éclats.	Très gros éclats.	Nombre total des éclats obtenus.	Observations.
Obus non tirés. .	66	32	3	3	104	5 culots brisés.
Obus tirés . . .	4	10	6	6	26	Les culots restent entiers.

86. La poudre noire contient une forte proportion de résidus, qui constituent un poids mort au point de vue de l'effet destructeur.

87. On a essayé, sans grand succès, d'améliorer cette poudre, en modifiant son dosage, en augmentant sa densité ; mais comme le bon marché et la sécurité dans le maniement, ne sont pas des qualités suffisantes pour lui conserver une suprématie longtemps incontestée, on cherche actuellement à la remplacer par d'autres explosifs plus puissants.

§ 2.

Emploi des explosifs de grande force absolue.

88. En substituant à la poudre noire un explosif de plus grande force absolue, on s'assure les avantages suivants :

1° Le projectile étant donné, on augmente les effets de l'explosion et par conséquent on obtient, en un temps plus court et avec une moindre consommation de munitions, la destruction d'un objectif désigné.

2° L'effet à produire par le projectile étant déterminé, on réalise cet effet avec un projectile de calibre plus faible et partant, avec une bouche à feu plus légère et plus mobile.

Jusqu'à présent, les explosifs puissants ont été réservés pour constituer une catégorie spéciale de projectiles, les obus torpilles ; mais leur emploi se généralisera, sans aucun doute, lorsqu'il sera possible de tirer des projectiles chargés de substances explosives violentes, avec des bouches à feu à hautes pressions, sans qu'il faille craindre une rupture dans l'âme.

89. Quand l'explosion d'un projectile se produit dans le canon, elle est due, généralement, au choc qu'il subit au moment de la formation des tenons (*n° 148*).

Trois procédés essentiellement différents, ont été préconisés pour éviter cette action prématurée.

90. En Amérique, Zalinski remplaça la poudre noire par l'air comprimé, comme agent de propulsion ; il imagina l'artillerie pneumatique.

Pour éviter un accident, l'air comprimé est introduit doucement dans l'âme et donne au projectile un premier déplacement ; puis, la pression est amenée graduellement à un maximum d'environ 42 atmosphères.

On parvient de cette manière à lancer des explosifs très sensibles au choc. Mais, les inconvénients de ce système sont très grands : un canon pneumatique étant une arme à très basse pression, le projectile n'acquiert une vitesse suffisante, au moment où il sort de l'âme, qu'en donnant au canon une longueur d'au moins 100 calibres; celui-ci devient alors très encombrant, et difficile à pointer sur des objectifs en mouvement.

91. Gruson a conçu une deuxième solution. Il a mis en œuvre une panclastite, obtenue par le mélange de deux liquides : le peroxyde d'azote et le sulfure de carbone.

Il a introduit dans le projectile deux vases de verre, qu'il a séparés des parois par des anneaux en caoutchouc, afin d'éviter une rupture pendant les transports.

L'un des récipients reçoit le peroxyde d'azote, et l'autre, le sulfure de carbone.

Par le choc qui se produit dans l'arme à feu, les verres se brisent, et par la rotation du projectile, les liquides se mélangent. Un explosif violent est créé et transporté vers l'obstacle.

Bien que l'obus Gruson obvie au danger de l'éclatement dans l'âme, il n'a eu qu'une existence éphémère, parce que son organisation est peu pratique ; d'ailleurs, les constituants de la matière explosive sont des fluides corrosifs et délétères.

92. Le troisième procédé, d'un usage courant, repose sur l'emploi de substances explosives relativement peu sensibles au choc ; elles dérivent de trois classes principales, savoir : du fulmi-coton, de la nitroglycérine et de l'acide picrique.

Pour donner à chaque explosif la stabilité nécessaire, sans amoindrir notablement son énergie, on a recours à un moyen spécial, en rapport avec sa nature.

Ainsi, le fulmi-coton est employé à l'état comprimé et humide, avec quelques traces de carbonate de soude. La dynamite-gomme, combinaison de nitroglycérine et de collodion, est utilisée à l'état de masse gélatineuse, avec introduction d'une très faible proportion de camphre

(4 °/₀). Enfin, les corps à base d'acide picrique, tels que la mélinite, la lyddite... etc., sont amenés préalablement à l'état amorphe, par la fusion.

On n'a pas encore trouvé un procédé général et certain, pour régler la sensibilité des explosifs ; on est dans la période des tâtonnements.

En résumé, on diminue l'influence des actions mécaniques, en ayant recours à des artifices de nature à élever la quantité de chaleur nécessaire à l'inflammation, savoir :

la compression ;

l'intervention de matières inertes ;

l'introduction de substances dissolvantes ;

la fusion.

93. Considérations relatives à l'emploi du détonateur. — Tous les moyens accumulés pour accroître l'insensibilité d'un explosif sont autant de difficultés à vaincre par l'amorçage.

Il est important de savoir alors, si le détonateur ne sera pas lui-même trop sujet aux influences mécaniques.

Pour des raisons données antérieurement (*n° 24*), le poids du fulminate de mercure contenu dans l'amorce est toujours très faible, au maximum 3 grammes.

Lorsque cette quantité de matière fulminante est insuffisante pour provoquer l'inflammation, on se décide, actuellement, à employer en plus grande masse, un second détonateur, une sorte de relais, dont la sensibilité est comprise entre celle de l'amorce au fulminate, et celle de la charge à enflammer.

Ainsi, en règle générale, on fait intervenir deux détonateurs ; on les nomme respectivement *détonateur primaire* et *détonateur secondaire*.

On choisit ordinairement pour détonateur secondaire, un explosif ayant la nature chimique de la substance à amorcer, mais une constitution physique différente.

Par exemple, la mélinite (acide picrique fondu) et le coton-poudre humide comprimé ont respectivement pour détonateur secondaire, l'acide picrique pulvérulent et le coton-poudre sec.

§ 3.

Marche à suivre dans les essais de réception des explosifs de rupture.

94. Avant d'adopter une substance explosive pour le chargement des projectiles, on la soumet à des essais méthodiques.

Nous indiquerons la marche à suivre dans les épreuves de réception d'un obus brisant, projectile destiné, on le sait, à agir sur les troupes et les obstacles matériels ; on pourra en déduire aisément les conditions d'organisation des charges pour les autres espèces de projectiles.

95. Epreuve préliminaire. — Elle a pour but de voir comment la substance explosive se comporte, au point de vue de l'explosion.

L'expérience est faite, à l'aide de cylindres (*), et comparativement à une autre substance, en service ; la poudre noire, par exemple.

L'explosif essayé est immédiatement écarté, si ses effets de rupture et de projection sont moindres que ceux obtenus avec cette poudre.

96. Epreuve de conservation. — Elle a pour objet de s'assurer si l'explosif présente la stabilité nécessaire.

A cet effet, la substance est mise en baril ou en caisse, et disposée dans un magasin, pendant un an au moins.

On fait ensuite la vérification des propriétés physiques et chimiques de la substance, afin de constater si elle a conservé ses qualités premières.

(*) Si l'obus n'est pas en projet, si le choix de l'explosif est seul en cause, on fera les essais sur les obus eux-mêmes.

Après cet essai, des projectiles chargés sont disposés sur une voiture et soumis à l'influence du roulage.

Lorsqu'on a effectué, en plusieurs reprises, un parcours d'au moins 50 kilomètres, on examine si le chargement ne s'est point modifié.

97. Epreuve de tir. — Elle sert à constater si le projectile ne se déforme pas et si l'explosif résiste au choc, durant son trajet dans l'âme.

L'expérience est faite avec une bouche à feu, la charge de tir est augmentée de manière à majorer la pression maximum des gaz d'environ 15 °/₀ ; le projectile chargé, mais dépourvu du détonateur, est tiré dans une butte en terre, à environ 50 mètres de la pièce ; enfin, une ou deux cibles en carton sont interposées entre le canon et la butte.

S'il n'y a pas déformation de l'obus, par le tir, on constate des trous circulaires dans les cibles.

Quand le chargement s'est bien comporté, on peut, après avoir retiré le projectile de la butte, rétablir le contact du détonateur et de la masse explosive.

98. Epreuve du détonateur. — Elle sert à apprécier le degré de sensibilité de l'amorce.

A cette fin, on tire successivement deux ou trois projectiles. Chaque obus est muni d'un détonateur, et ne contient que la charge minimum de rupture et une couche de sable vers le culot.

Si le détonateur est trop sensible, l'éclatement se fait dans l'âme ; s'il manque de sensibilité l'explosion ne se produit point dans la butte.

99. Epreuve d'éclatement au repos. — Elle a pour objet de constater si la fragmentation de l'obus se produit bien, et si la force vive des éclats est suffisante.

Le projectile, après avoir subi victorieusement les épreuves précitées, est suspendu au centre d'une chambre d'éclatement, à parois métalliques.

L'inflammation de la charge est provoquée par l'électricité.

Après l'explosion, on compte le nombre des éclats, et on détermine leurs poids. Dans une seconde épreuve on apprécie la vitesse des fragments, par les pénétrations obtenues dans des planches épaisses, appuyées contre les parois intérieures de la chambre d'éclatement.

On admet généralement que l'explosion s'est faite dans de bonnes conditions :

1° Lorsque le poids des éclats, compris entre 5 et 25 grammes, est au moins égal à la moitié du poids du projectile.

Il est nécessaire de pouvoir compter sur quelques fragments d'un poids supérieur à 25 grammes, pour détruire le matériel ; et sur un grand nombre d'éclats d'un poids inférieur à 5 grammes, pour enrayer le fonctionnement des organes délicats des pièces.

2° Quand la force vive de chaque éclat est d'au moins 8 kilogrammètres, force vive jugée nécessaire pour mettre l'homme hors de combat.

---

100. Renseignements relatifs aux explosifs de rupture en usage dans les diverses puissances.

Puissances.	Désignation des explosifs.	Qualités physiques et compositions chimiques.	
Belgique	Poudres noires.		
	1° Poudre d'artillerie à grains fins. (P — F).	Grains	irréguliers. grosseur ; 0mm5 à 1mm. nombre, au gramme ; 3300 à 3600.
		Densités	gravimétrique (un litre) ; 0,940 à 0,970. réelle ; 1,770 à 1,795.
		Composition chimique	salpêtre, 78. soufre, 9,5. charbon de bois, 12,5.
	2° Poudre d'artillerie à grains ordinaires. (P — O)	Grains	irréguliers. grosseur ; 1mm5 à 2mm5. nombre, au gramme ; 200 à 250.
		Densités	gravimétrique (un litre) ; 0,920 à 0,950. réelle ; 1,563 à 1,588.
		Composition chimique	salpêtre, 75. soufre, 12. charbon de bois, 13.
	3° Poudre d'artillerie à grains de 6 — 10mm, de forte densité. $\left(\frac{\text{P. G. 6 — 10}}{\text{Fte Dte}}\right)$	Grains	irréguliers. grosseur ; 6 à 10mm. nombre, à l'hectogramme ; 230 à 270.
		Densités	gravimétrique (2 litres) ; 0,970 à 1,000. réelle ; 1,755 à 1,780.
		Composition chimique	salpêtre, 74. soufre, 10. charbon de bois, 16.

Puissances.	Désignation des explosifs pour obus-torpilles.	Qualités physiques et compositions chimiques.
Belgique	Macarite (*).	Densité gravimétrique ; 2,600. Composition chimique { binitrotoluène. azotate de plomb.
France	Mélinite.	Explosif à base d'acide picrique fondu.
Allemagne	Granatfüllung (**).	Explosif à base d'acide picrique fondu.
Angleterre	Lyddite.	Explosif à base d'acide picrique fondu.
Autriche	Ecrasite.	Gélatine explosive traitée par le sulfate d'ammoniaque.
Italie	Coton-poudre humide comprimé.	La charge est divisée en rondelles, puis elle est agglomérée avec un mélange de $\left(\frac{2}{3}\right)$ paraffine et de $\left(\frac{1}{3}\right)$ cire.
Russie	Coton-poudre humide comprimé.	
Etats-Unis	Emmensite. Dynamite-gomme (***).	Parties égales d'acide picrique, de nitrate de soude et de nitrate d'ammoniaque. Appelée aussi gélatine explosive { nitroglycérine 88, coton-poudre soluble 8, camphre 4

(*) Cet explosif est à l'essai en Belgique.

(**) Ce qui veut dire, littéralement, remplissage d'obus.

(***) Les renseignements donnés sur les explosifs en usage à l'étranger sont extraits de la « Revue d'artillerie ».

CHAPITRE IV.

EFFETS DES POUDRES DANS LES ARMES A FEU.

---

§ 1.

Conditions dans lesquelles doit s'opérer la combustion des poudres.

101. Action des gaz dans une arme à feu. — Dans cette étude l'arme à feu est considérée comme une machine thermique, dont la partie principale est le canon.

Les gaz engendrés par la combustion de la charge agissent :

1° vers l'avant, sur le culot du projectile, ce qui détermine son mouvement dans l'âme ;

2° vers l'arrière, sur la culasse du canon, ce qui provoque, en général, le recul de l'arme à feu ;

3° sur les parois du canon, ce qui amène les déformations élastiques du tube (*).

102. Effet utile de la charge. — On nomme respectivement *vitesse initiale* et *force vive initiale du projectile*, la vitesse et la force vive de translation acquises par ce corps, au moment où il sort du canon.

(*) On verra, dans un autre cours, que les dimensions des armes à feu sont calculées de façon à éviter les déformations permanentes du canon, sous l'action des pressions.

Considérant que le but principal d'une arme à feu est de communiquer au projectile une certaine force vive initiale, on adopte généralement celle-ci comme mesure de *l'effet utile de la charge* mise en œuvre dans cette arme.

103. Régularité de combustion de la charge. — Il est évident que la constance de l'effet utile dépend de la régularité de la combustion.

On obtient cette régularité par les moyens suivants :

1° On donne aux divers grains de la poudre une densité, une forme et des dimensions aussi identiques que possible, et on ne met en fabrication que des matières premières très pures.

2° On opère de manière que la combustion se propage par surfaces parallèles, dans chaque grain, en empêchant toute désagrégation, par une compression énergique de la galette destinée à former les grains.

3° On fait en sorte que le temps nécessaire à l'inflammation de tous les grains, soit négligeable par rapport à la durée de combustion d'un grain quelconque. On supprime ainsi l'influence des variations se produisant, d'un coup à l'autre, dans les durées d'inflammation.

Lorsqu'on a déterminé par expérience, le poids Q_a de l'amorce fusante qui produit la combustion la plus régulière d'une charge de tir, de surface d'inflammation σ, on peut alors fixer le poids Q'_a de l'amorce destinée à une autre charge de même poudre, de surface d'inflammation σ', par la proportion *(n° 29)* :

$$\frac{Q_a}{Q'_a} = \frac{\sigma}{\sigma'}.$$

Il s'ensuit, qu'en principe, la quantité Q_a doit varier, non seulement avec la nature de la poudre, mais aussi avec le poids de la charge de tir. Dans la pratique on ne peut s'astreindre à observer ce principe, parce qu'il faudrait une étoupille spéciale pour chaque poudre et même pour chaque charge de tir.

Il est plus simple de disposer une *charge d'amorçage* dans la charge de tir (fig. 13), en arrière de celle-ci et en regard du canal de lumière.

(Fig. 13)

A charge d'amorçage.
B lumière, obturée pendant le tir.

La poudre prismatique brune *(n° 186)* a une charge d'amorçage composée de quelques grains de poudre prismatique noire à 7 canaux ; pour les poudres sans fumée, cette amorce est constituée par quelques petits grains de poudre noire.

4° On doit répartir uniformément la charge suivant la longueur de la chambre à poudre, comme nous l'indiquons sur la figure 14 (A).

Il ne faut pas que la charge puisse se déplacer longitudinalement, parce qu'on doit craindre un raté d'amorçage ou un à-coup de pression (*). La disposition de la figure 14 (B), est donc à rejeter.

(A) (B)

(Fig. 14)

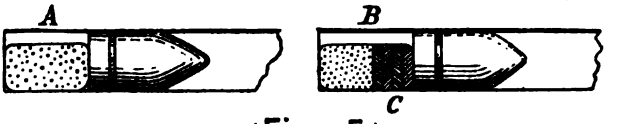
104. Charge normale et charges réduites. — Le tracé intérieur d'une arme à feu doit être fait, en vue du tir du projectile principal avec la forte charge, dite *charge normale*. Mais souvent, des considérations économiques et des raisons de service, conduisent

(*) Il résulte des expériences de Vieille, qu'une mauvaise disposition de la charge, amène des à-coups de pressions.

à employer des *charges réduites*. On observe alors que la combustion de la poudre est d'autant plus irrégulière que le poids de la petite charge diffère plus du poids de la charge normale.

On pourrait atténuer cet inconvénient, en donnant à toutes les charges une position invariable dans la chambre, et en conservant, à peu près, la même densité de chargement.

Dans ce but, on confectionnerait une charge réduite en plaçant la poudre dans le sachet destiné à la forte charge, que l'on achèverait de remplir avec des rondelles en carton (fig. 15).



(Fig. 15)

A forte charge.
B charge réduite.
C rondelles en carton.

105. Rappel des lois de la combustion. — Lorsque les conditions précédentes seront satisfaites, la combustion de la charge se fera d'après les lois suivantes :

1° La durée de combustion d'une charge sera la même que celle d'un grain.

2° La combustion d'un grain sera achevée, lorsque la moitié de la plus petite dimension de ce grain sera brûlée.

3° La forme du grain sera caractérisée par les fonctions $F(u)$ et $M(u)$.

106. Remarque. — Les formes en lamelle ou en tube, données aux grains des poudres nouvelles, peuvent être considérées comme équivalentes, au point de vue balistique, parce que les diagrammes $F(u)$ relatifs à ces grains, se confondent très approximativement, avec une ligne droite *(n° 41)*.

Dès lors, on peut admettre, dans les applications numériques :

$$F(u) = M(u) = u.$$

Nous ne nous servirons pas immédiatement de ces simplifications, afin de laisser aux formules que nous allons établir toute leur généralité.

---

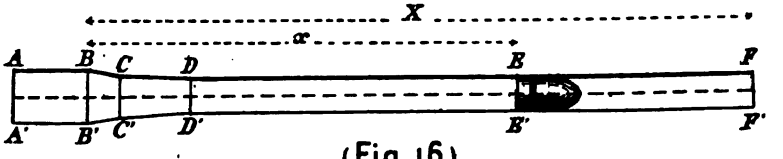
§ 2.

Loi fondamentale de la détente des gaz dans les armes à feu.

107. Examinons quelle est la modification à apporter à la formule :

$$p = \frac{fQF(u)}{V_0 - \gamma_1 Q}\left(\frac{V_0 - \gamma_1 Q}{V - \gamma_1 Q}\right)^n, \qquad (39)$$

établie précédemment *(n° 55)*, pour tenir compte du tracé intérieur de l'arme à feu (fig. 16).



(Fig. 16)

AA' fond de l'âme ;
$ABA'B'$ chambre de la charge ou chambre à poudre (cylindre) ;
BB' position du culot du projectile, à l'heure 0 ;
$BCDB'C'D'$ chambre du projectile (surfaces tronconiques) ;
FF' tranche de la bouche ;
EE' position du culot du projectile, à l'heure t.

Soient : V_0 le volume de la chambre à poudre ;
V_c le volume $BFB'F'$;
X la distance du plan BB' au plan FF' ;
x le chemin parcouru par le projectile, à l'heure t ;
V le volume $AEA'E'$.

En vue de transformer l'âme en un cylindre droit de section transversale S et de longueur $X + \lambda$, posons :

$$V_c = X \,.\, S$$

et

$$\frac{V_0 - \eta Q}{S} = \lambda, \tag{40}$$

λ étant un paramètre que nous nommons *longueur réduite de la chambre à poudre.*

Nous obtenons alors :

$$V - \eta Q = V_0 + Sx - \eta Q = S(x + \lambda),$$

et l'expression (39) devient :

$$p = \frac{fQF(u)}{S\lambda}\left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n.$$

108. Il y a deux phases à distinguer dans la détente des gaz de la poudre.

La première phase commence à l'heure où le projectile se met en mouvement, et elle se termine lorsque la charge est entièrement comburée ; le projectile a parcouru alors un chemin que nous représentons par x_1.

Pendant cette phase la pression des gaz est donnée par la formule :

$$p = \frac{fQF(u)}{S\lambda}\left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n, \tag{41}$$

dans laquelle $F(u)$ varie depuis 0 jusqu'à 1 ; et x, de 0 à x_1.

La deuxième phase commence au moment où la première s'achève, et elle se termine à l'heure où le culot du projectile arrive à la tranche de la bouche.

Pendant cette phase la pression est exprimée par la relation :

$$p = \frac{fQ}{S\lambda}\left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^n, \tag{42}$$

dans laquelle la variable x est comprise entre x_1 et X.

109. On peut obtenir expérimentalement la valeur de l'exposant n, en procédant comme suit :

On élimine K entre les expressions

$$K + 1 = n$$

et

$$f = KU_0,$$

trouvées antérieurement.

Il vient ainsi :

$$n = 1 + \frac{f}{U_0},$$

formule dans laquelle les quantités f et U_0 peuvent être mesurées. (*)

En faisant les essais, pour les poudres usuelles, on constate que n varie peu d'une poudre à l'autre, on a d'ailleurs

$$n = 1,11$$

comme valeur moyenne. (**)

(*) Toutes les lois que nous établirons ultérieurement, sont indépendantes de la valeur numérique attribuée à l'exposant n.

(**) Si l'on fait le calcul pour la poudre noire, en prenant comme unités fondamentales le kilogramme, le décimètre et la seconde, on obtient :

$$n = 1 + \frac{f}{U_0} = 1 + \frac{261500}{3111000} = 1,084.$$

§ 3.

Lois du mouvement de translation du projectile, pendant la combustion de la charge.

110. Hypothèses. — Les lois du mouvement de translation du projectile dans l'arme à feu sont établies dans les hypothèses suivantes ;

1° l'arme à feu est au repos ;

2° le projectile est indéformable et son axe de figure coïncide avec l'axe du canon, pendant son parcours dans l'âme ;

3° les composantes, suivant l'axe de l'arme, des réactions exercées par les parois du canon et par l'atmosphère, ont une résultante dont l'intensité est ρSp. Dans cette expression, Sp est la pression totale des gaz sur le culot du projectile et ρ un coefficient constant, dont nous déterminerons ultérieurement la valeur *(n°s 163 et 164)*.

111. Expression de la vitesse du projectile en fonction de u.

Soient : m la masse du projectile ;
v sa vitesse à l'heure t ;
v_1 sa vitesse à la fin de combustion.

L'équation du mouvement de translation du projectile a la forme suivante :

$$m\frac{dv}{dt} = Sp - \rho Sp = (1 - \rho)\, Sp\,;$$

mais, pour trouver la relation qui relie v à u, nous sommes amené à écrire :

$$m\frac{dv}{du}\frac{du}{dt} = (1 - \rho)\, Sp, \qquad (43)$$

et comme,

$$\frac{du}{dt} = \frac{du}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{1}{Z} \cdot \frac{\varphi}{f} p, \tag{44}$$

en divisant membre à membre les deux formules précédentes, nous obtenons :

$$m \frac{dv}{du} = (1 - \rho) S \frac{Zf}{\varphi}.$$

Si nous intégrons cette équation entre les limites 0 et u, il vient :

$$mv = (1 - \rho) S \cdot \frac{fZ}{\varphi} \cdot u,$$

ce qui donne, en définitive :

$$v = \frac{S(1 - \rho) fZ}{m\varphi} u. \tag{45}$$

112. En faisant $u = 1$ dans la relation ci-dessus, nous avons, pour l'expression de la vitesse du projectile à la fin de la combustion de la charge :

$$v_1 = \frac{S(1 - \rho) fZ}{m\varphi}, \tag{46}$$

et si nous divisons, membre à membre, les formules (45) et (46), nous trouvons :

$$\frac{v}{v_1} = u. \tag{47}$$

113. Des expressions précédentes nous déduisons les conclusions suivantes :

1° La vitesse du projectile croît proportionnellement à u.

2° Lorsqu'on tire des poudres différentes, dans une même arme à

feu, la vitesse du projectile à la fin de la combustion de la charge, varie proportionnellement au facteur $\frac{fZ}{\varphi}$.

3° Quand on connait la vitesse initiale d'un projectile, on peut, en substituant le résultat dans l'équation (45), s'assurer si la combustion s'est faite complètement dans l'âme ; il suffit pour cela de tirer la valeur de u de cette équation.

Si l'on constate alors que

$$u < 1,$$

on pourra en inférer que la poudre n'est pas totalement brûlée au moment où le projectile sort du canon.

114. Expression du chemin parcouru par le projectile en fonction de u.

Calculons d'abord $\frac{dx}{du}$ en observant que :

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{du}\frac{du}{dt}.$$

Mais nous avons trouvé :

$$v = v_1 u,$$

et aussi : *(n° 111)*

$$\frac{du}{dt} = \frac{\varphi p}{fZ};$$

ce qui nous donne :

$$v_1 u = \frac{dx}{du}\frac{\varphi p}{fZ},$$

et en remplaçant p par sa valeur déduite de la formule (41), nous obtenons :

$$v_1 u = \frac{dx}{du}\frac{\varphi Q}{S\lambda Z}\left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^n F(u).$$

Si nous effectuons maintenant la séparation des variables, nous trouvons :

$$\int_0^x \left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n dx = \frac{v_1 S\lambda Z}{\varphi Q} \int_0^u \frac{u}{F(u)}\, du,$$

et l'intégration conduit à l'expression :

$$\frac{\lambda}{n-1}\left[1 - \left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^{n-1}\right] = \frac{v_1 S\lambda Z}{\varphi Q} M(u) \qquad (n^\circ\ 12),$$

ou :

$$1 - \left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^{n-1} = \frac{(n-1)\, v_1 SZ}{\varphi Q} M(u).$$

En vue de simplifier les écritures, posons ensuite :

$$A = \frac{(n-1)\, v_1 SZ}{\varphi Q},$$

A étant une constante, que nous nommerons *coefficient de tir*.

Nous arrivons ainsi à la formule :

$$1 - \left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^{n-1} = AM(u). \qquad (48)$$

115. Eu égard à la relation (46) qui donne l'expression de v_1, nous pouvons mettre le coefficient de tir sous l'une des formes :

$$A = \frac{(n-1)(1-\rho) S^2 f Z^2}{mQ\varphi^2} = \frac{n-1}{1-\rho} \frac{mv_1^2}{fQ}, \qquad (49)$$

que nous utiliserons ultérieurement.

116. Lorsque

$$x = x_1,$$

nous avons :

$$M(u) = M(1),$$

ce qui permet d'écrire :

$$1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x_1}\right)^{n-1} = AM(1). \qquad (50)$$

De cette relation nous tirons les conclusions suivantes :

1° Pour que la charge brûle entièrement dans l'arme à feu, il faut que la quantité x_1, vérifie la condition :

$$x_1 \leqq X.$$

2° En posant :

$$x_1 = X,$$

on pourra calculer la quantité A et en déduire la limite supérieure $2Z_0$ de l'épaisseur à donner au grain, pour que la combustion de la charge s'opère dans l'arme.

117. Quand une bouche à feu tire différentes charges, il se peut qu'elles ne brûlent pas toutes entièrement, il est intéressant de connaître alors quel est le poids Q_0 de la plus petite des charges se comburant dans le canon ?

On le calculera à l'aide de l'équation :

$$1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_0 + X}\right)^{n-1} = A_0 M(1), \qquad (51)$$

dans laquelle les quantités λ_0 et A_0 désignent respectivement la longueur réduite de la chambre à poudre et le coefficient de tir correspondant à Q_0.

118. Expression de la pression en fonction de u.

Nous avons obtenu les formules :

$$p = \frac{fQ\,F(u)}{S\lambda}\left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n$$

et

$$1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^{n-1} = AM(u).$$

Si nous éliminons $\frac{\lambda}{\lambda + x}$ entre ces relations, il vient :

$$p = \frac{fQ}{S\lambda}F(u)\left[1 - AM(u)\right]^{\frac{n}{n-1}}. \qquad (52)$$

119. Au moment où la combustion finit, on a :

$$u = 1,$$

$$F(u) = 1,$$

$$M(u) = M(1);$$

ce qui nous donne :

$$p_1 = \frac{fQ}{S\lambda}\left[1 - AM(1)\right]^{\frac{n}{n-1}}.$$

120. De la pression maximum. — Quand une charge se combure dans une arme à feu, la pression tend à augmenter avec la production des gaz, et à diminuer en raison du déplacement du projectile. Par suite de ces circonstances, la pression passe par un maximum, elle décroit ensuite continûment jusqu'à la sortie du projectile.

Cherchons ce maximum P.

A cet effet, dérivons l'expression *(n° 118)*.

$$F(u)\left[1-AM(u)\right]^{\frac{n}{n-1}}$$

par rapport à u, et égalons cette dérivée à zéro.

Nous obtenons ainsi :

$$F'(u)\left[1-AM(u)\right]^{\frac{n}{n-1}}-\frac{n}{n-1}\left[1-AM(u)\right]^{\frac{n}{n-1}-1}.AM'(u)F(u)=0.$$

En remarquant que :

$$M'(u)=\frac{u}{F(u)},$$

et en divisant par le facteur

$$\left[1-AM(u)\right]^{\frac{1}{n-1}},$$

il vient :

$$F'(u)\left[1-AM(u)\right]-\frac{n}{n-1}Au=0,$$

d'où nous tirons :

$$A=\frac{F'(u)}{M(u)\,F'(u)+\frac{n}{n-1}u}. \qquad (53)$$

Si nous désignons maintenant par u_m la valeur particulière de u qui vérifie la condition précédente, nous aurons finalement :

$$P=\frac{fQ}{S\lambda}F(u_m)\left[1-AM(u_m)\right]^{\frac{n}{n-1}}. \qquad (54)$$

121. En vue de faciliter les calculs numériques, nous avons établi, pour chacune des poudres actuellement en service en Belgique *(nos 209 et 210)*, une table donnant les valeurs de u_m et de

$$F(u_m)\left[1 - AM(u_m)\right]^{\frac{n}{n-1}} = B,$$

qui correspondent aux valeurs de A.

Si l'on considère une poudre, pour laquelle la table n'a pas été calculée, on peut déterminer u_m par l'expression :

$$A = \frac{F'(u_m)}{\frac{n}{n-1} u_m},$$

obtenue en négligeant le terme $F'(u_m)\, M(u_m)$ dans la relation (53).

L'erreur résultant de cette suppression n'affecte que la deuxième décimale de la valeur de u_m ; elle est insensible dans les applications.

Voici un exemple à l'appui de cette remarque :

On donne $A = 0,1439$, et l'on sait que le grain a une forme irrégulière. On demande la valeur de u_m ?

u_m se calculera par la formule :

$$0,1439 = \frac{3 - 6\, u_m + 3\, u_m^2}{10,09\, u_m}.$$

En résolvant l'équation du second degré en u_m, et en observant que cette quantité ne peut être supérieure à l'unité, on a :

$$u_m = 0,51 \text{ (par excès).}$$

La valeur exacte, déduite de la table *(n° 209)* est $u_m = 0,50$.

122. Expression de la durée du trajet en fonction de u.

Si nous remplaçons dans la relation :

$$\frac{dt}{du} = \frac{fZ}{\varphi p},$$

la pression par sa valeur (52), il vient :

$$\frac{dt}{du} = \frac{ZS\lambda}{\varphi Q} \frac{1}{F(u)\left[1 - AM(u)\right]^{\frac{n}{n-1}}};$$

ce qui conduit à :

$$t = \frac{ZS\lambda}{\varphi Q} \int_0^u \frac{1}{F(u)\left[1 - AM(u)\right]^{\frac{n}{n-1}}} du.$$

En désignant par T la valeur de t correspondant à $u = 1$, nous avons :

$$T = \frac{ZS\lambda}{\varphi Q} \int_0^1 \frac{1}{F(u)\left[1 - AM(u)\right]^{\frac{n}{n-1}}} du. \qquad (55)$$

Cette intégrale définie peut s'évaluer graphiquement.

On obtient une valeur approximative de la durée de combustion de la charge, en admettant la loi du mouvement uniformément varié ; on trouve alors :

$$T = \frac{2x_1}{v_1}.$$

§ 4.

Lois du mouvement du projectile, après la combustion de la charge.

123. Expression de la pression en fonction du chemin parcouru par le projectile. — La pression en fonction du chemin parcouru est donnée par la relation (42) :

$$p = \frac{fQ}{S\lambda}\left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^n.$$

On obtiendra la pression p_b à l'extrémité du canon, en faisant dans cette formule $x = X$.

124. Expression de la vitesse en fonction du chemin parcouru par le projectile. — En appliquant le principe des forces vives, depuis le moment où la combustion a pris fin jusqu'à l'instant où le projectile sort de l'arme, nous obtenons :

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \int_{x_1}^{x} Sp\,(1-\rho)\,dx\,;$$

si nous remplaçons alors p par sa valeur, nous avons :

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{(1-\rho)\,fQ}{\lambda}\int_{x_1}^{x}\left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^n dx,$$

et, après intégration, il vient :

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1-\rho}{n-1}fQ\left[\left(\frac{\lambda}{\lambda+x_1}\right)^{n-1} - \left(\frac{\lambda}{\lambda+x}\right)^{n-1}\right].$$

Des formules (49) et (50), nous déduisons :

$$\frac{1}{2} mv_1^2 = \frac{1-\rho}{2(n-1)} fQ.\ A,$$

et

$$\left(\frac{\lambda}{\lambda + x_1}\right)^{n-1} = 1 - AM(1).$$

La combinaison des trois dernières relations nous conduit, en définitive, à la suivante :

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1-\rho}{n-1} fQ \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^{n-1} - A\left[\frac{2M(1)-1}{2}\right]\right\}. \quad (56)$$

125. Vitesse initiale. — Nous aurons la vitesse initiale v_0 du projectile, en remplaçant x par X dans la relation précédente, ce qui donnera :

$$\frac{1}{2} mv_0^2 = \frac{1-\rho}{n-1} fQ \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + X}\right)^{n-1} - A\left[\frac{2M(1)-1}{2}\right]\right\}. \quad (57)$$

De cette expression nous déduisons les conclusions suivantes :

1° La vitesse initiale augmente avec la longueur de l'arme à feu.

2° Cette vitesse dépend de la forme du grain ; elle diminue lorsque le coefficient de tir augmente.

§ 5.

Représentation graphique des lois du mouvement d'un projectile dans une arme à feu déterminée.

126. — La vitesse du projectile, la pression des gaz et la durée du trajet sont des fonctions du chemin x parcouru par le projectile dans l'âme ; nous les représentons symboliquement par :

$$V(v, x) = 0,$$

$$P(p, x) = 0,$$

$$T(t, x) = 0.$$

Il est généralement impossible d'obtenir ces fonctions sous forme explicite, parce qu'on ne peut éliminer la variable u entre les formules. (*)

Mais on sait représenter chacune de ces fonctions, avec précision, par un diagramme ; il suffit pour cela de choisir un système d'axes de coordonnées rectangulaires, de déterminer un certain nombre de points, et de tracer les tangentes en ces points.

Ces diagrammes permettent d'apprécier, d'une manière synoptique, comment la poudre se comporte dans l'arme à feu considérée.

C'est le diagramme des pressions qui est le plus important, parce qu'il permet d'établir le tracé extérieur d'une arme à feu en projet.

127. Diagramme des vitesses, $V(x, v) = 0$. — Nous trouverons les points du diagramme des vitesses à l'aide des formules suivantes :

(*) L'élimination peut se faire, lorsqu'on admet la simplification indiquée au n° 106.

$$v = v_1 u,$$

$$1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^{n-1} = AM(u) ;$$

(première phase de la détente).

et

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1-\rho}{n-1} fQ \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^{n-1} - A \left[\frac{2M(1) - 1}{2}\right] \right\}.$$

(deuxième phase de la détente).

Le tracé des tangentes nécessite la connaissance de la dérivée $\frac{dv}{dx}$. Nous calculons cette dérivée, comme suit :

$$\frac{dv}{dx} = \frac{dv}{du} \frac{du}{dx} ;$$

mais

$$\frac{dv}{du} = v_1,$$

et en vertu des relations (48) et (49), il vient :

$$\frac{du}{dx} = \frac{(1-\rho) fQ}{mv_1^2 \lambda M'(u)} \left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n ; \qquad (58)$$

et par conséquent,

$$\frac{dv}{dx} = \frac{(1-\rho) fQ}{mv_1 \lambda M'(u)} \left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n .$$

(première phase de la détente).

En prenant la dérivée de la relation (56) par rapport à x, nous obtiendrons de même :

$$\frac{dv}{dx} = \frac{(1-\rho) fQ}{mv \cdot \lambda} \left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n .$$

(deuxième phase de la détente).

Pour $x = 0$, observons que :

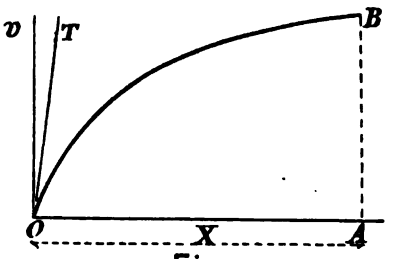
$$u = 0 \text{ et } M'(0) = \frac{1}{a_1} ;$$

la tangente à l'origine a donc pour coefficient angulaire, l'expression :

$$\left(\frac{dv}{dx}\right)_{x=0} = \frac{(1-\rho) fQ}{m v_1 \lambda} a_1.$$

La dérivée $\frac{dv}{dx}$ n'étant jamais nulle, la fonction $V(v, x) = 0$, n'a pas de maximum.

La figure 17 représente l'allure générale du diagramme des vitesses.



(Fig. 17)

AB est la vitesse initiale ; OT la tangente au point O.

128. Diagramme des pressions, $P(x, p) = 0$. — Nous déterminerons les coordonnées des points du diagramme des pressions, à l'aide des formules :

$$p = \frac{fQ}{S\lambda} F(u) \left[1 - AM(u)\right]^{\frac{n}{n-1}},$$

$$1 - \left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^{n-1} = AM(u).$$

(première phase de la détente).

et

$$p = \frac{fQ}{S\lambda}\left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n.$$

(deuxième phase de la détente).

Pour tracer les tangentes, il faut connaître la dérivée $\frac{dp}{dx}$; nous la calculons comme suit :

$$\frac{dp}{dx} = \frac{dp}{du}\,\frac{du}{dx};$$

mais

$$\frac{dp}{du} = \frac{fQ}{S\lambda}\left[1 - AM(u)\right]^{\frac{1}{n-1}}\left[F'(u) - AM(u)\,F'(u) - \frac{n}{n-1}\,Au\right],$$

et comme la dérivée $\frac{du}{dx}$ est donnée par la relation (58), il vient en définitive :

$$\left.\begin{aligned} \frac{dp}{dx} &= \frac{(1-\rho)}{mv_1^2}\,\frac{fQ}{\lambda M'(u)}\left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n \\ &\times \frac{fQ}{S\lambda}\left[1 - AM(u)\right]^{\frac{1}{n-1}}\left[F'(u) - AM(u)\,F'(u) - \frac{n}{n-1}\,Au\right]. \end{aligned}\right\}$$

(première phase de la détente).

Nous obtenons aussi :

$$\frac{dp}{dx} = -\,n\,\frac{fQ}{S}\left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^{n+1}.$$

(deuxième phase de la détente).

Lorsque $x = 0$, nous avons :

$$u = 0,$$

$$M'(0) = \frac{1}{a_1};$$

$$F'(0) = a_1,$$

$$M(0) = 0;$$

d'où il résulte que le coefficient angulaire à l'origine a pour valeur :

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_{x=0} = \frac{(1-\rho) f^2 Q^2 a_1^2}{m v_1^2 \lambda^2 S}.$$

129. Examinons quels sont les signes que peut prendre la dérivée $\frac{dp}{dx}$, pendant la première phase de la détente ?

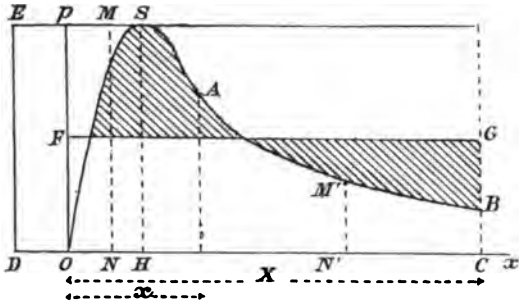
Ils dépendent uniquement des signes du facteur :

$$C = F'(u) - AM(u)F'(u) - \frac{n}{n-1}Au = F'(u)\left[1 - AM(u)\right] - \frac{n}{n-1}Au,$$

puisque les autres termes sont toujours positifs.

De l'étude que nous avons faite des fonctions $F(u)$ et $M(u)$ (*n*os *40 et 46*), il résulte : que la quantité C est positive pour toutes les valeurs de u comprises entre $u = 0$ et $u = u_m$; qu'elle s'annule pour $u = u_m$ et qu'elle devient négative pour les valeurs de u comprises entre u_m et 1.

Eu égard aux considérations qui précèdent, nous pouvons indiquer l'allure générale du diagramme des pressions. (Fig. 18).



(Fig. 18)

Les courbes *OSA* et *AB* correspondent respectivement à la première phase et à la deuxième phase de la détente.

SH représente la pression maximum *P*.

130. Soient : *OD* la longueur de la chambre à poudre ;

DE une parallèle à l'axe des pressions *op* ;

SE la tangente au sommet de la courbe.

Nous obtenons de cette manière le tracé *ESAB*, dont on se sert pour déterminer les épaisseurs des parois, quand l'arme à feu est en projet.

Ainsi, *MN* et *M'N'* sont les pressions à utiliser, pour obtenir les dimensions du canon dans les sections transversales menées respectivement par les points *N* et *N'*.

La partie *OS* du diagramme des pressions est ici sans emploi, parce que, la pression en un point quelconque de la capacité située en arrière du culot est égale à *P*, quand le projectile a parcouru le chemin *OH*.

131. De la pression moyenne. — L'aire comprise entre la courbe $OSAB$ et l'axe ox (fig. 18) a pour valeur

$$\int_0^X p dx.$$

Mais en appliquant le principe des forces vives, pendant le parcours X du projectile, nous obtenons :

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = S(1-\rho) \int_0^X p dx,$$

d'où

$$\int_0^X p dx = \frac{m v_0^2}{2 S (1-\rho)}.$$

Ainsi, l'aire $OSABC$ est proportionnelle à l'effet utile de la charge.

On nomme *pression moyenne des gaz* dans l'âme, une pression OF, déterminée de manière que l'aire du rectangle $OFGC$ soit équivalente à l'aire $OSABC$.

En désignant cette pression par P_m, nous aurons :

$$P_m X = \int_0^X p dx = \frac{m v_0^2}{2S(1-\rho)},$$

d'où nous tirons :

$$P_m = \frac{m v_0^2}{2SX(1-\rho)}. \qquad (59)$$

132. Diagramme des durées, $T(t, x) = 0$. — On calculera les coordonnées de quelques points du diagramme des durées, à l'aide de l'expression :

$$t = \frac{2x}{v},$$

obtenue en substituant, par approximation, au mouvement réel du projectile, le mouvement uniformément varié.

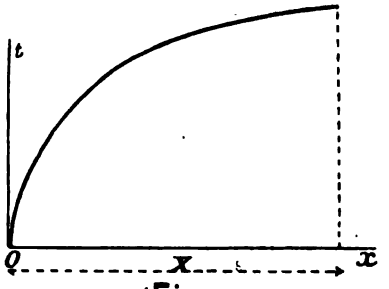
Le coefficient angulaire d'une tangente se déterminera par la relation :

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} = \frac{1}{v_1 u}.$$

En faisant alors $u = 0$ dans cette formule, il vient :

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=0} = \infty.$$

Nous pouvons déduire de ces considérations l'allure générale du diagramme des durées (fig. 19).



(Fig. 19)

§ 6.

Théorie de la similitude.

133. Définitions. — Deux armes à feu sont dites *semblables*, lorsque leurs tracés intérieurs forment des figures géométriquement semblables.

Pour qu'elles soient *semblablement chargées*, il faut :

1° que les poids des projectiles et des charges soient proportionnels aux cubes des calibres ;

2° que les grains des poudres tirées soient géométriquement semblables et de même composition chimique ;

3° que les dimensions homologues de ces grains soient dans le même rapport que les calibres.

La similitude est *complète*, lorsque toutes les conditions énoncées ci-dessus sont satisfaites ; elle est *incomplète*, si certaines de ces conditions seulement sont remplies.

134. La théorie de la similitude est une des plus fécondes ; elle fournit, notamment, tous les éléments nécessaires à l'élaboration du projet d'une arme à feu, connue dans sa forme, mais dont les dimensions sont à calculer de manière à satisfaire à des conditions données.

135. Lois de la similitude complète. — Considérons deux armes à feu de calibre c_1 et c_2, semblables et semblablement chargées ; affectons de l'indice *1* toutes les notations relatives à la première arme, et de l'indice *2*, toutes celles se rapportant à la seconde. Cela étant, établissons les quatre propositions suivantes :

PROPOSITION I. — *Pour des parcours proportionnels aux calibres, les épaisseurs brûlées des grains comparés sont proportionnelles aux calibres.*

Considérons les relations :

$$1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + x_2}\right)^{n-1} = A_2 M(u_2),$$

et

$$1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + x_1}\right)^{n-1} = A_1 M(u_1).$$

Or,

$$\lambda_2 = \left[\frac{V_0 - \eta Q}{S}\right]_2,$$

et

$$\lambda_1 = \left[\frac{V_0 - \eta Q}{S}\right]_1;$$

ce qui donne, en tenant compte des conditions de similitude :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{c_2}{c_1},$$

et alors :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + x_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + x_1}.$$

Mais nous avons aussi $A_2 = A_1$, puisque les quantités mises en facteurs sont égales, de part et d'autre, dans l'expression :

$$\left[(n-1)(1-\rho) \cdot \frac{S^2 Z^2}{mQ} \cdot \frac{f}{\varphi^2}\right]_2 = \left[(n-1)(1-\rho) \cdot \frac{S^2 Z^2}{mQ} \cdot \frac{f}{\varphi^2}\right]_1.$$

En conséquence, nous obtenons :

$$M(u_2) = M(u_1),$$

ou :

$$u_2 = u_1,$$

ou encore :

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{c_2}{c_1}.$$

PROPOSITION II. — *Pour des parcours proportionnels aux calibres, les vitesses des projectiles sont égales.*

Pour démontrer cette proposition, il suffit d'examiner les relations :

$$v = \frac{(1-\rho)f}{\varphi} \cdot \frac{SZ}{m} \cdot u,$$

$$v^2 = \frac{2f(1-\rho)}{n-1} \cdot \frac{Q}{m} \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^{n-1} - A\left[\frac{2M(1)-1}{2}\right] \right\},$$

en tenant compte des conditions de similitude et des résultats obtenus précédemment.

PROPOSITION III. — *Pour des parcours proportionnels aux calibres, les pressions sont égales.*

Cette proposition se déduit de la formule :

$$p = \frac{fQF(u)}{S\lambda}\left(\frac{\lambda}{\lambda + x}\right)^n$$

et des considérations antérieures.

PROPOSITION IV. — *Pour des parcours proportionnels aux calibres, les durées des trajets sont aussi proportionnelles aux calibres.*

C'est une conséquence de la relation ;

$$v = \frac{dx}{dt}$$

et des propositions précédentes.

En résumé, pour des parcours proportionnels aux calibres, les vitesses sont égales, les pressions sont égales, et enfin les durées des trajets ainsi que les épaisseurs brûlées sont proportionnelles aux calibres.

136. Lois de la similitude incomplète. — Supposons les conditions de similitude satisfaites, sauf celle relative aux grains, et envisageons le cas où les deux armes tirent la même poudre.

PROPOSITION I. — *Pour des parcours proportionnels aux calibres, les épaisseurs brûlées sont données par la condition :*

$$\frac{M\left(\frac{z_2}{Z}\right)}{M\left(\frac{z_1}{Z}\right)} = \frac{M(u_2)}{M(u_1)} = \left(\frac{c_2}{c_1}\right)^2.$$

En effet, nous avons démontré que :

$$A_2 M(u_2) = A_1 M(u_1),$$

et, comme dans le cas considéré

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2,$$

la proposition énoncée est établie.

PROPOSITION II. — *Pour des parcours proportionnels aux calibres, les rapports des vitesses, pendant chacune des phases de la détente, sont donnés par les expressions :*

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{u_2\, c_1}{u_1\, c_2};$$

(première phase de la détente).

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 = \frac{1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + x_1}\right)^{n-1} - A_1 \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 \left[\frac{2M(1) - 1}{2}\right]}{1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + x_1}\right)^{n-1} - A_1 \left[\frac{2M(1) - 1}{2}\right]}.$$

(deuxième phase de la détente).

Nous obtenons ces relations en introduisant les conditions de la similitude incomplète dans les formules fondamentales.

PROPOSITION III. — *Pour des parcours proportionnels aux calibres, les rapports des pressions, pendant chacune des phases de la détente, sont donnés par les égalités :*

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{F(u_2)}{F(u_1)}; \qquad \textit{(première phase de la détente).}$$

et

$$\frac{p_2}{p_1} = 1. \qquad \textit{(deuxième phase de la détente).}$$

PROPOSITION IV. — *Pour des parcours proportionnels aux calibres, le rapport des durées est exprimé par :*

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{c_2}{c_1} \frac{v_1}{v_2}.$$

137. Application. — On possède une arme à feu type de calibre c_1, pour laquelle on a établi les diagrammes des vitesses, des pressions et des durées, en fonction des parcours du projectile.

On demande de déterminer, par la théorie de la similitude complète : le calibre, les éléments du tracé intérieur, les conditions de chargement, ainsi que les diagrammes des vitesses, des pressions et des durées, pour une arme en projet, dont l'effet utile doit être r fois plus grand que celui de l'arme type ?

Pour résoudre ces questions, il suffit de connaître le rapport de similitude $\frac{c_2}{c_1}$.

En exprimant que les forces vives initiales sont proportionnelles à r, nous avons :

$$\frac{m_2 v_2^2}{m_1 v_1^2} = r,$$

et comme les vitesses sont égales pour des parcours proportionnels aux calibres, il vient :

$$\frac{m_2}{m_1} = r,$$

ou :

$$\left(\frac{c_2}{c_1}\right)^3 = r ;$$

ce qui donne aussi :

$$c_2 = c_1 \sqrt[3]{r}.$$

Remarque. — Lorsque les armes à feu tirent la même poudre, on détermine le calibre c_2 par l'équation :

$$r\left(\frac{c_1}{c_2}\right)^3 = \frac{1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + x_1}\right)^{n-1} - A_1\left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2\left[\frac{2M(1) - 1}{2}\right]}{1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + x_1}\right)^{n-1} - A_1\left[\frac{2M(1) - 1}{2}\right]},$$

obtenue en observant les conditions de la similitude incomplète.

§ 7.

Théorie du recul des armes à feu.

138. Inconvénients du recul. — Si l'on considère une bouche à feu sur son affût, le recul de la pièce a pour effet d'augmenter la fatigue des servants, de ralentir le service, de nécessiter une installation spacieuse ; on corrige partiellement ces défauts par l'intervention d'un frein.

Si l'on envisage un fusil, le recul de l'arme provoque une action pénible sur l'épaule du tireur ; on atténue cet effet par une organisation rationnelle de l'arme et de la cartouche.

La théorie du recul a pour objet principal de déterminer les éléments nécessaires à l'établissement d'un projet de frein d'affût, et d'indiquer la voie à suivre, dans la construction des armes à feu et dans le choix des poudres, pour contenir les effets du recul dans des limites acceptables.

139. Hypothèses. — Pour ne point sortir du cadre de ce travail, nous considérerons la masse reculante et le projectile comme des corps indéformables ; nous supposerons que cette masse se meuve sur un plan horizontal, l'axe du canon restant parallèle au sol.

140. Calcul de la résistance d'un frein d'affût. — Il y a deux phases à considérer dans le recul : la première commence à l'instant, pris pour heure 0, où le projectile se met en marche, et elle se termine à l'heure τ_0 de sa sortie de l'arme à feu ; la seconde commence à l'instant τ_0, et finit à l'heure τ_1 correspondant à l'arrêt de la masse reculante, c'est-à-dire de la pièce.

Pour isoler le système matériel, formé par la masse reculante, le projectile et les produits de la combustion, de tout ce qui l'entoure,

nous remplaçons la résistance du frein agissant sur l'affût, l'action des frottements, etc., par des forces extérieures.

Cela étant, nous décomposons ces forces normalement et parallèlement à la direction du recul, et nous nommons *résistance au recul*, la résultante des actions parallèles à cette direction.

141. Considérons d'abord la première phase du recul.

Soient : M la masse de la pièce ;
R sa résistance au recul, à l'heure t ;
ψ sa vitesse à cet instant ;
y son déplacement au même moment ;
ψ_0 la vitesse du recul à l'heure τ_0 ;
y_0 le déplacement correspondant ;
m la masse du projectile ;
v sa vitesse à l'heure t ;
x son déplacement à ce moment ;
v_0 sa vitesse à l'heure τ_0 ;
X le déplacement correspondant ;
m' la masse des produits de la combustion ;
v' la vitesse du centre de gravité de ces produits, à l'heure t.

Appliquons le principe des quantités de mouvement, depuis l'heure 0 jusqu'à l'heure t, et considérons le sens du recul comme direction positive ; nous avons alors la relation :

$$M\psi - mv - m'v' = -\int_0^t Rdt.$$

Mais l'expérience nous permet de poser :

$$\frac{v'}{v} = 0.$$

θ étant une constante dont la valeur sera déterminée ultérieurement *(n° 146)*, en conséquence, nous obtenons :

$$M\psi - mv\left(1 + \theta\frac{m'}{m}\right) = -\int_0^t Rdt\,;$$

et si nous observons que :

$$\psi = \frac{dy}{dt} \quad \text{et} \quad v = \frac{dx}{dt},$$

nous trouvons, par intégration :

$$mx\left(1 + \theta\frac{m'}{m}\right) - My = \int_0^t\int_0^t Rdt. \qquad (60)$$

Pour l'heure τ_0, les relations deviennent :

$$mv_0\left(1 + \theta\frac{m'}{m}\right) - M\psi_0 = \int_0^{\tau_0} Rdt, \qquad (61)$$

$$mX\left(1 + \theta\frac{m'}{m}\right) - MY_0 = \int_0^{\tau_0}\int_0^{\tau_0} Rdt. \qquad (62)$$

142. Etablissons maintenant les lois du mouvement pour la deuxième phase du recul.

A cet effet, affectons de l'indice $_1$, les déplacements et les vitesses correspondant à cette phase, et appliquons à la masse reculante, le principe des quantités de mouvement depuis l'heure τ_0 jusqu'à l'heure t postérieure à la première ; il vient alors :

$$M\psi_1 - M\psi_0 = -\int_{\tau_0}^t Rdt,$$

et par intégration nous obtenons, après avoir remplacé ψ_1 par $\frac{dy_1}{dy}$:

$$M(y_1 - Y_0) - M\psi_0(t - \tau_0) = -\int_{\tau_0}^{t}\int_{\tau_0}^{t} Rdt.$$

Pour l'heure τ_1, nous avons les relations :

$$M\psi_0 = \int_{\tau_0}^{\tau_1} Rdt, \tag{63}$$

$$M\psi_0(\tau_1 - \tau_2) - M(Y_1 - Y_0) = \int_{\tau_0}^{\tau_1}\int_{\tau_0}^{\tau_1} Rdt. \tag{64}$$

143. Cas d'une résistance constante. — Lorsque la résistance au recul est constante, ce qui est le cas le plus fréquent, on peut calculer R de manière à limiter le recul de la pièce à une longueur donnée Y_1.

En effet, nous déduisons des relations (61), (62), (63) et (64), le système d'équations :

$$\left.\begin{aligned}
&mv_0\left(1 + \theta\frac{m'}{m}\right) - M\psi_0 = R\tau_0,\\
&mX\left(1 + \theta\frac{m'}{m}\right) - MY_0 = \frac{R\tau_0^2}{2},\\
&M\psi_0 = R(\tau_1 - \tau_0),\\
&M\psi_0(\tau_1 - \tau_0) - M(Y_1 - Y_0) = \frac{R}{2}(\tau_1 - \tau_0)^2.
\end{aligned}\right\} \tag{65}$$

Dans ces équations, les inconnues sont : ψ_0, τ_1, Y_0 et R ; les quantités v_0 et τ_0 étant déterminées, par l'étude que nous avons faite du mouvement du projectile dans l'âme.

En principe, la vitesse initiale du projectile, calculée antérieurement, dans le cas de l'arme à feu au repos, est supérieure à celle

qui apparait dans le système (65) ; la différence entre ces vitesses est ψ_0. Mais dans les applications on peut toujours négliger ψ_0 en présence de v_0, sans commettre une erreur sensible.

En résumé, on sait déterminer la résistance constante R limitant le recul à une longueur donnée ; et cette résistance étant connue, on peut entamer les projets de frein et d'affût. (*)

144. Lois du recul libre. — On dit que le recul est *libre*, lorsque la résistance au recul est nulle ou négligeable.

On peut réaliser cette condition : il suffit de disposer la bouche à feu dans un cadre glissant sur des bandes métalliques convenablement lubrifiées, et de tirer des projectiles à ceintures préalablement entaillées de façon à loger les cloisons du canon.

Quand on veut simplement mettre en parallèle les effets nuisibles du recul de deux systèmes, on admet que les masses reculantes se déplacent librement, et l'on adopte comme termes de comparaison, les forces vives de ces masses correspondant aux effets utiles des charges.

145. Si nous introduisons la condition :

$$R = 0,$$

dans les deux premières équations du système (65), nous obtenons :

$$mv_0\left(1 + 0\frac{m'}{m}\right) - M\psi_0 = 0, \tag{66}$$

$$mX\left(1 + 0\frac{m'}{m}\right) - MY_0 = 0. \tag{67}$$

En remplaçant ensuite, dans l'expression $\frac{M\psi_0^2}{2}$, la quantité ψ_0 par sa valeur déduite de la formule (66), nous trouvons :

$$\frac{M\psi_0^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2}\frac{m}{M}\left(1 + 0\frac{m'}{m}\right)^2. \tag{68}$$

(*) Cours d'organisation des affûts et des freins.

Ainsi, *la force vive du recul varie proportionnellement à l'effet utile de la charge ; elle augmente dans le rapport de la masse du projectile à celle du système reculant ; elle croît dans le rapport de la masse de la charge à celle du projectile.*

146. Le paramètre θ a été déterminé par expérience.

On a mesuré la quantité ψ_0 (*n° 205*), et l'on a déduit alors la valeur de θ de l'expression :

$$mv_0\left(1+\theta\frac{m'}{m}\right)-M\psi_0=0\,;$$

on a obtenu ainsi, pour la poudre noire,

$$\theta=\frac{1}{2}.$$

Des essais faits à l'Ecole de tir de France, en tirant des poudres sans fumée dans des fusils, il semble résulter que la valeur de θ est la même pour toutes les poudres.

147. L'expérience a établi aussi que la masse reculante n'acquiert sa vitesse maximum ψ_m, qu'après la sortie du projectile de l'arme à feu, et que le rapport

$$\theta'=\frac{\psi_m}{\psi_0},$$

varie avec la nature de la poudre.

Pour la poudre noire ; on obtient :

$$\theta'=\frac{1}{3}.$$

§ 8.

Théorie de la rayure.

148. Considérations préliminaires. — Le projectile oblong reçoit dans l'arme à feu un mouvement de rotation autour de son axe de figure ; ce mouvement lui est imprimé, pour qu'il se comporte, le mieux possible, pendant son trajet dans l'air et dans l'obstacle à détruire.

Afin de produire cette rotation, on a creusé dans la paroi intérieure du canon, des rainures de formes spéciales, appelées *rayures*. Dans ces rayures s'engagent des saillies conductrices du projectile, nommées *tenons*.

Actuellement ces tenons s'obtiennent par *forcement*, c'est-à-dire, en fixant sur le corps du projectile une ceinture de cuivre, dans laquelle les rayures produiront des empreintes, dès que le projectile se déplacera par la pression des gaz (*).

Pour déterminer une rayure, il faut connaître le tracé du profil et celui de la directrice de la rayure.

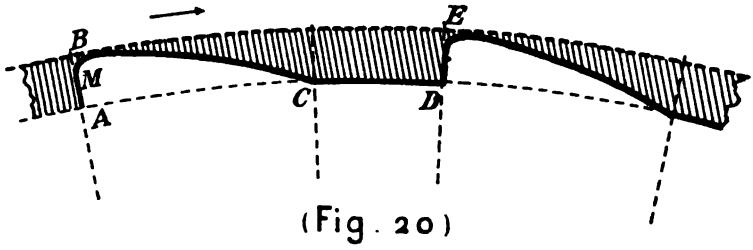
149. Du profil de la rayure. — Le *profil d'une rayure* est la section faite dans celle-ci, par un plan perpendiculaire à l'axe de l'arme à feu.

Les profils les plus en usage aujourd'hui sont représentés dans les figures 20 et 21 ; on les nomme respectivement : *profil en dent de scie* et *profil à flancs parallèles*.

Le profil ABC (fig. 20) est formé d'une droite AB, passant par le

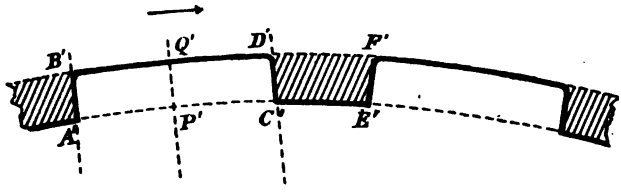
(*) L'étude détaillée du forcement est faite dans un autre cours.

centre de l'arc de cercle AC, et d'un arc de cercle BC ayant son centre sur AB.



(Fig. 20)

ABC, profil de la rayure. AB, génératrice du flanc de tir de la rayure.
$BCDE$, profil de la cloison. BC, génératrice du flanc neutre.
La flèche indique le sens du mouvement de rotation du projectile, pour un observateur placé à la culasse.



(Fig. 21)

$A'B'C'D'$, profil de la rayure. $A'B'$, génératrice du flanc de tir.
$C'D'E'F'$, profil de la cloison. $C'D'$, génératrice du flanc neutre.

Le profil $A'B'C'D'$ (fig. 21) est obtenu en menant deux droites $A'B'$ et $C'D'$ parallèlement au rayon $Q'P'$ passant par le milieu P' de l'arc $A'C'$; la courbe $B'D'$ est un arc de cercle concentrique à l'arc $A'C'$.

150. Définitions. — Nous nommerons :

point directeur d'un profil, le point milieu de la génératrice rectiligne du flanc de tir ;

cylindre directeur, un cylindre droit ayant le même axe que le canon, et passant par les points directeurs des divers profils ;

directrice de la rayure, une courbe gauche représentant le lieu des points directeurs de tous les profils faits dans une même rayure ;

inclinaison de la directrice ou *inclinaison de la rayure* en un point, l'angle aigu formé en ce point par la tangente à la directrice et par la génératrice du cylindre directeur ;

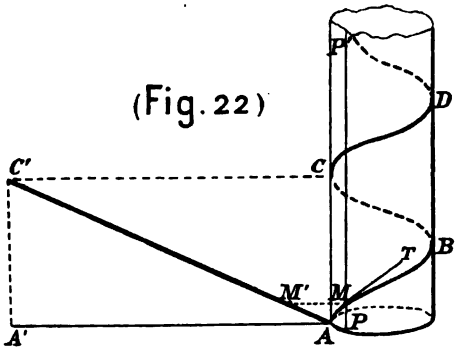
directrice uniforme ou *rayure uniforme*, celle dont l'inclinaison est constante en tous les points ;

directrice progressive ou *rayure progressive*, celle dont l'inclinaison croît, suivant une certaine loi, de la culasse vers la bouche ;

pas d'une directrice uniforme ou d'une *hélice*, la longueur comprise entre les deux points d'intersection voisins de cette directrice et d'une génératrice du cylindre directeur ;

pas d'une directrice progressive en un point déterminé, le pas de l'hélice ayant la même inclinaison en ce point que la directrice considérée ;

transformée de la directrice, la ligne formée par la directrice lorsqu'on développe le cylindre directeur sur un plan tangent à ce cylindre.



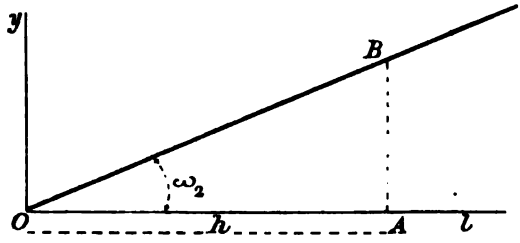
Dans le croquis (fig. 22) nous représentons : un cylindre directeur ; une hélice $ABCD$; la tangente MT à cette hélice au point M ; l'inclinaison TMP' de la rayure en M ; le pas AC ; la transformée AC' de la courbe ABC.

151. Equation de la transformée de la directrice. — Menons par l'origine O de la directrice deux axes de coordonnées rectangulaires oy et ol, et dirigeons ol suivant l'axe du canon.

L'hélice a alors pour transformée une ligne droite OB', dont l'équation est :

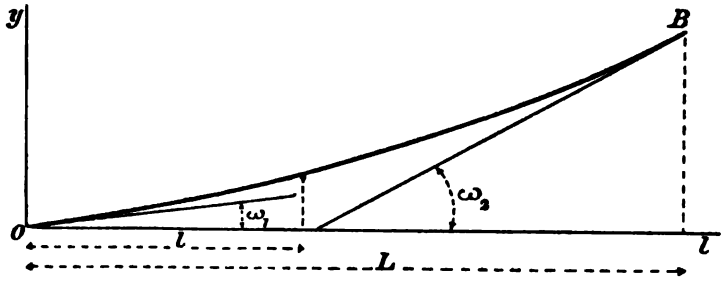
$$y = tg\omega_2\, l,$$

ω_2 étant l'inclinaison de l'hélice considérée et l une longueur portée sur l'axe ol, à partir du point O. (fig. 23).



(Fig. 23)

La directrice progressive a pour transformée une ligne courbe OB, dont l'inclinaison initiale est représentée par ω_1 et l'inclinaison finale par ω_2. (fig. 24).



(Fig. 24)

L est la distance de l'origine de la directrice, à la tranche de la bouche,

Dans la pratique cette courbe est généralement une parabole ayant pour équation :

$$y = \frac{\Psi l^2}{2} + \Psi_1 l, \tag{69}$$

Ψ et Ψ_1, étant deux constantes.

Pour déterminer ces constantes, en fonction des quantités ω_1, ω_2 et L, dérivons la valeur de y par rapport à l, ce qui nous donne :

$$\frac{dy}{dl} = \Psi l + \Psi_1 ; \tag{70}$$

faisons maintenant successivement $l = o$ et $l = L$ dans la relation ci-dessus, nous obtenons alors :

$$\Psi_1 = tg\, \omega_1$$

et

$$\Psi L + \Psi_1 = tg\, \omega_2,$$

d'où :

$$\Psi = \frac{tg\, \omega_2 - tg\, \omega_1}{L}.$$

152. Pas d'une rayure uniforme.

Soient : h le pas de la rayure ;
ω_2 l'inclinaison de la rayure ;
b le rayon du cylindre directeur.

Dans le triangle rectangle OAB (fig. 23), nous avons :

$$AB = OA\, tg\, \omega_2 ;$$

mais, si OA est le chemin parcouru par le projectile, pendant le

temps qu'il met pour faire un tour complet autour de son axe de figure, nous pouvons écrire :

$$AB = 2\pi b \qquad \text{et} \qquad OA = h,$$

et dès lors :

$$2\pi b = h \, tg \, \omega_2,$$

ou :

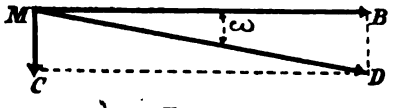
$$h = \frac{2\pi b}{tg \, \omega_2}. \tag{71}$$

Ainsi, *pour une même valeur de* ω_2 *le pas croît proportionnellement au rayon du cylindre directeur.*

Une arme de petit calibre a donc un pas relativement court, toutes choses égales d'ailleurs.

153. Relation entre la vitesse angulaire de rotation et la vitesse de translation du projectile.

Soient, pour l'heure t : M le point directeur du profil, passant le milieu de la surface d'appui d'un tenon ;
ω l'inclinaison de la rayure en ce point ;
Ω la vitesse angulaire de rotation du projectile ;
v sa vitesse de translation.



(Fig. 25)

En considérant la fig. 25, on a :

$$MB = v \qquad \text{et} \qquad MC = \Omega b.$$

Mais :

$$MC = BD = MB\ tg\ \omega,$$

en conséquence :

$$\Omega b = v\ tg\ \omega, \tag{72}$$

et

$$\frac{\Omega}{v} = \frac{tg\ \omega}{b}.$$

Le rapport de la vitesse angulaire de rotation à la vitesse de translation du projectile est donc constant ou variable, suivant que la directrice de la rayure est uniforme ou progressive.

154. Accélération de la rotation. — Nous obtiendrons l'accélération de la rotation en dérivant l'expression (72) par rapport au temps, il vient ainsi :

$$b\frac{d\Omega}{dt} = \frac{d\,(v\ tg\ \omega)}{dt}.$$

Dans le cas de la rayure uniforme cette formule se réduit à :

$$b\frac{d\Omega}{dt} = tg\ \omega_2 \frac{dv}{dt}. \tag{73}$$

Si nous envisageons la rayure progressive, nous trouvons :

$$b\frac{d\Omega}{dt} = tg\ \omega \frac{dv}{dt} + v\frac{d\,.\,tg\ \omega}{dt};$$

mais nous avons aussi :

$$\frac{d\,.\,tg\ \omega}{dt} = \Psi\frac{dl}{dt} \qquad \text{et} \qquad \frac{dl}{dt} = v\,;$$

ce qui nous donne, en définitive :

$$b\frac{d\Omega}{dt} = tg\,\omega\frac{dv}{dt} + \Psi v^2. \qquad (74)$$

155. Influence du forcement sur la pression maximum des gaz et sur la vitesse initiale du projectile. — Lorsqu'on recherche expérimentalement l'influence du forcement, on constate qu'il a pour effet d'augmenter la pression maximum des gaz et la vitesse initiale du projectile.

Au premier abord ce dernier résultat paraît paradoxal ; il semble que le travail du forcement doive absorber une certaine partie de la force vive initiale du projectile, mais il faut remarquer que sa suppression crée des fuites de gaz et rend la combustion plus lente.

On conçoit d'ailleurs que le passage des gaz entre la ceinture et les rayures est préjudiciable à la conservation de la bouche à feu, et à ce point de vue, une *ceinture renforcée* (*) est préférable à une *ceinture normale*.

Voici maintenant comment les essais ont été faits : on a tiré, dans un canon de 10c (**), des projectiles avec ceintures normales, et des projectiles avec ceintures entaillées de manière à supprimer le travail du forcement, et l'on a mesuré, à chaque coup, les quantités P et v_o. (***)

(*) La ceinture normale a pour diamètre maximum, le diamètre intérieur de la bouche à feu compté à partir du fond d'une rayure ; la ceinture renforcée à un diamètre un peu plus grand que celui-ci.

(**) Etude sur les effets de la poudre dans un canon de 10c, par Sebert et Hugoniot.

(***) La substitution, à la ceinture normale, d'une ceinture ajustée dans les rayures, entraine une réduction importante dans la valeur du maximum de la vitesse du recul.

Voici les vitesses maxima mesurées :

Ceinture normale	7^m068 ;
Ceinture ajustée	6^m744.

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau suivant :

CONDITIONS DU TIR.	Pression maximum. $k - c^2$	Vitesse initiale. $m - s$	OBSERVATIONS.
Ceinture normale	2399,4	492,40	Poids de la charge, $3^k,200$. Poids du projectile, $12^k,000$.
Ceinture entaillée	1399,1	453,97	

156. Hypothèses admises dans le calcul des réactions du projectile sur l'arme à feu. — Lorsque le projectile se meut dans l'âme, il produit certaines actions sur les parois du canon, dont on tient compte dans le calcul, en y introduisant des forces ou réactions. Il est nécessaire de maintenir ces réactions entre certaines limites sous peine de compromettre l'existence, soit des cloisons de l'arme à feu, soit des tenons du projectile.

Pour déterminer ces forces nous admettrons :

1° l'homogénéité du projectile, ainsi que la coïncidence de son axe de figure et de l'axe du canon, pendant le trajet dans l'âme ;

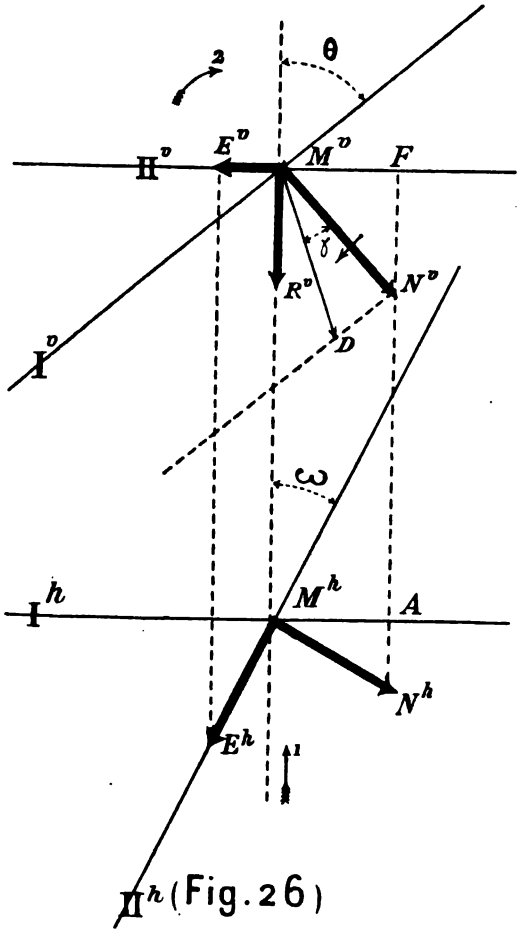
2° la réduction des pressions exercées par un tenon sur le flanc de tir correspondant, à une réaction unique appliquée au centre de figure de la surface d'appui ;

3° la symétrie, par rapport à l'axe de l'arme à feu, des réactions des divers tenons.

157. Représentation graphique des réactions. — Cela étant, représentons par la géométrie descriptive, le plan tangent au flanc de tir au point d'application M d'une réaction, ainsi que les composantes de cette réaction suivant un système d'axes que nous allons définir (fig. 26).

Choisissons comme plan vertical de projection, un plan perpendi-

culaire à l'axe du canon, et comme plan horizontal de projection, un plan perpendiculaire au rayon passant par le point M.



(Fig. 26)

La droite I est la génératrice du flanc de tir ; elle fait un angle θ avec le rayon passant par M.

La droite II est la tangente à la directrice de la rayure ; elle fait un angle ω avec l'axe du canon.

Le plan tangent en M à la surface du flanc de tir, est déterminé par les droites I et II.

La flèche 1 indique le sens du mouvement de translation du projectile.

La flèche 2 indique le sens du mouvement de rotation du projectile.

La pression au point M sur le flanc de tir peut se décomposer comme suit :

1° Une pression normale au plan tangent au point M ; elle est représentée, en projections, par les lignes $M^v N^v$, $M^h N^h$.

2° Une pression tangentielle ; elle est représentée, en projections, par les lignes $M^v E^v$, $M^h E^h$.

3° Une pression radiale ; elle est représentée sur la verticale par $M^v R^v$.

La pression normale, en vraie grandeur $M^v D$, a été obtenue en rabattant le plan projetant verticalement MN sur le plan de front du point M ; cette pression fait un angle γ avec sa projection verticale $M^v N^v$.

158. Il y a entre les angles ω, θ et γ une relation que nous allons établir.

Nous avons :

$$AN^h = AM^h \operatorname{tg} \omega,$$

$$AM^h = FM^v = M^v N^v \cos \theta,$$

enfin

$$AN^h = DN^v = M^v N^v \operatorname{tg} \gamma.$$

En égalant les deux valeurs de AN^h, il vient :

$$M^v N^v \operatorname{tg} \gamma = M^v N^v \cos \theta \operatorname{tg} \omega,$$

ou :

$$\operatorname{tg} \gamma = \cos \theta \operatorname{tg} \omega. \qquad (75)$$

159. Calcul des réactions normales aux tenons et des réactions parallèles à l'axe du canon.

Soient : m la masse du projectile ;

r son rayon de giration, par rapport à l'axe de figure ;

N le nombre de rayures ;

b le rayon du cylindre directeur.

Soient encore, pour l'heure t : p_n la pression normale au flanc de tir ;

p_t la pression tangentielle ;

p_r la pression radiale ;

R la résultante des réactions projetées sur l'axe du canon ;

M le moment des réactions par rapport à cet axe ;

Ω la vitesse angulaire de rotation du projectile ;

v sa vitesse de translation.

On admet qu'il y a un rapport constant entre les pressions p_t et p_n, posons donc :

$$p_t = \mu\, p_n,$$

μ étant un coefficient à déterminer par expérience, de manière à tenir compte du forcement, des frottements, etc. ; nous le nommerons *coefficient de forcement.*

Si nous projetons d'abord toutes les réactions sur l'axe du canon, et si nous prenons ensuite les moments de ces réactions par rapport à cet axe, en observant que les forces p_r n'interviennent pas dans le calcul, nous obtenons les relations :

$$R = N\, p_n\, (\sin \gamma + \mu \cos \omega) \tag{76}$$

$$M = Nb\, p_n\, (\cos \gamma \cos \theta - \mu \sin \omega). \tag{77}$$

Cela étant, observons que l'équation du mouvement de translation du projectile est :

$$m \frac{dv}{dt} = Sp - R, \tag{78}$$

et que l'équation du mouvement de rotation a la forme :

$$mr^2 \frac{d\Omega}{dt} = M ;$$

mais en vertu de la relation (74), nous avons aussi :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{b}\left(\operatorname{tg} \omega \frac{dv}{dt} + \Psi v^2\right) ;$$

ce qui nous permet d'écrire :

$$\frac{mr^2}{b}\left(\operatorname{tg} \omega \frac{dv}{dt} + \Psi v^2\right) = M. \tag{79}$$

Enfin, si nous éliminons les quantités $m\frac{dv}{dt}$ et M entre les formules (76), (77), (78) et (79), il vient :

$$R = Np_n (\sin \gamma + \mu \cos \omega),$$

et

$$\left(\frac{r}{b}\right)^2 \left[\operatorname{tg} \omega (Sp - R) + \Psi m v^2\right] = Np_n \left(\cos \gamma \cos \theta - \mu \sin \omega\right) ;$$

et de ce système, nous déduisons alors :

$$R = \frac{\left(\frac{r}{b}\right)^2 (Sp \operatorname{tg} \omega + \Psi m v^2)(\sin \gamma + \mu \cos \omega)}{\left(\frac{r}{b}\right)^2 \operatorname{tg} \omega (\sin \gamma + \mu \cos \omega) + \cos \gamma \cos \theta - \mu \sin \omega} \tag{80}$$

et

$$Np_n = \frac{\left(\frac{r}{b}\right)^2 (Sp \operatorname{tg} \omega + \Psi m v^2)}{\left(\frac{r}{b}\right)^2 \operatorname{tg} \omega (\sin \gamma + \mu \cos \omega) + \cos \gamma \cos \theta - \mu \sin \omega} . \tag{81}$$

Nous allons maintenant, en nous appuyant sur ces formules générales, déterminer l'influence particulière de chaque élément de la rayure.

160. Conclusions relatives à la quantité Np_n. — Supposons que deux bouches à feu A et B, soumises à la même pression maximum P, ne diffèrent que par les tracés des rayures, et examinons quels sont les moyens à préconiser pour réduire les pressions normales Np_n tendant à cisailler les tenons et les cloisons ?

Comparons d'abord les profils des rayures.

La quantité Np_n diminue quand on réduit la valeur de θ.

En effet, si nous remplaçons $\cos\theta$ par sa valeur $\frac{\operatorname{tg}\gamma}{\operatorname{tg}\omega}$, déduite de la formule (75), le dénominateur de l'expression (81) devient :

$$\left(\frac{r}{b}\right)^2 \operatorname{tg}\omega\,(\sin\gamma + \mu\cos\omega) + \frac{\sin\gamma}{\operatorname{tg}\omega} - \mu\sin\omega,$$

et ce dénominateur croît avec γ.

Sa plus grande valeur correspond à la condition :

$$\cos\theta = 1,$$

c'est-à-dire, à

$$\theta = 0.$$

Cette condition est réalisée dans le profil en dent de scie, il est donc préférable au profil à flancs parallèles.

161. Comparons maintenant les tracés des directrices, en supposant que la bouche à feu A ait une directrice uniforme et la bouche à feu B une directrice progressive, celles-ci ayant d'ailleurs la même inclinaison finale ω_2.

Nous montrerons plus loin *(n° 164)*, en faisant une application numérique, que si $\theta = 0$, nous pouvons poser, sans commettre une erreur sensible :

$$\left(\frac{r}{b}\right)^2 \operatorname{tg} \omega (\sin \gamma + \mu \cos \omega) + \cos \gamma \cos \theta - \mu \sin \omega = 1,$$

et conséquemment, l'expression (81) se réduit à :

$$Np_n = \left(\frac{r}{b}\right)^2 (Sp \operatorname{tg} \omega + \Psi m v^2), \tag{82}$$

dans le cas de la rayure progressive.

Si nous envisageons alors la rayure uniforme, pour laquelle nous avons :

$$\omega = \omega_2 \quad \text{et} \quad \Psi = 0,$$

il vient :

$$Np_n = \left(\frac{r}{b}\right)^2 Sp \operatorname{tg} \omega_2. \tag{83}$$

Dans l'arme B, la quantité p_n croit généralement de la culasse vers la bouche, où l'on a :

$$p = p_b, \quad \omega = \omega_2, \quad v = v_0 ;$$

et dès lors, la cloison et le tenon doivent résister à une pression normale :

$$\frac{1}{N}\left(\frac{r}{b}\right)^2 \left(Sp_b \operatorname{tg} \omega_2 + \Psi m v_0^2\right).$$

Si nous considérons l'arme A, la pression normale augmente proportionnellement à p, et le maximum de p_n correspond à la condition :

$$p = P ;$$

dans cette arme, la cloison et le tenon doivent supporter une pression normale :

$$\frac{1}{N}\left(\frac{r}{b}\right)^2 SP \operatorname{tg} \omega_2.$$

Ainsi, il y aura un avantage marqué, au point de la résistance, à adopter la rayure progressive, lorsque la différence :

$$\frac{1}{N}\left(\frac{r}{b}\right)^2 \left[S \operatorname{tg} \omega_2 (P - p_b) - \Psi m v_0^2\right]$$

sera considérable.

162. Conclusions relatives à la quantité R. — Dans le cas où $\theta = 0$, le calcul numérique montre *(n° 164)*, que l'on peut mettre l'expression (80), sous la forme simplifiée suivante :

$$R = \left(\frac{r}{b}\right)^2 (\operatorname{tg} \omega + \mu)(Sp \operatorname{tg} \omega + \Psi m v^2), \qquad (84)$$

lorsqu'on envisage la rayure progressive.

Si l'on considère la rayure uniforme, on obtient :

$$R = \left(\frac{r}{b}\right)^2 (\operatorname{tg} \omega_2 + \mu).\ Sp \operatorname{tg} \omega_2. \qquad (85)$$

Dans la formule (84), R acquiert sa plus grande valeur, lorsque le projectile arrive à la bouche ; dans la relation (85) le maximum de R correspond à :

$$p = P.$$

Cela nous permet de dire que généralement la résistance à la translation du projectile est plus grande au début et moindre à la fin du trajet, dans l'arme A que dans l'arme B.

163. Nous pouvons calculer maintenant la valeur du coefficient ρ tenant compte des résistances *(n° 110)*.

Si nous considérons la rayure progressive, nous avons :

$$R = \rho Sp = \left(\frac{r}{b}\right)^2 (\operatorname{tg}\omega + \mu)\left(\operatorname{tg}\omega + \frac{\Psi m v^2}{Sp}\right) Sp,$$

d'où nous déduisons :

$$\rho = \left(\frac{r}{b}\right)^2 (\operatorname{tg}\omega + \mu)\left(\operatorname{tg}\omega + \frac{\Psi m v^2}{Sp}\right). \qquad (86)$$

Si nous envisageons la rayure uniforme, nous trouvons :

$$\rho = \left(\frac{r}{b}\right)^2 (\operatorname{tg}\omega_2 + \mu)\operatorname{tg}\omega_2. \qquad (87)$$

Ainsi, *la quantité ρ est une variable ou une constante, suivant que l'arme à feu a une rayure progressive ou une rayure uniforme.*

Dans le calcul de la résistance due aux rayures progressives, on peut, avec une grande approximation, substituer à la variable ρ une valeur constante, donnée par l'expression :

$$\rho = \left(\frac{r}{b}\right)^2 (\operatorname{tg}\omega_m + \mu)\operatorname{tg}\omega_m, \qquad (88)$$

sachant que :

$$\operatorname{tg}\omega_m = \frac{\operatorname{tg}\omega_1 + \operatorname{tg}\omega_2}{2}.$$

En résumé, en adoptant la rayure progressive de préférence à la rayure uniforme, on se procure les avantages suivants : toutes choses égales d'ailleurs, le maximum de la pression normale sur le tenon ou sur la cloison est réduit ; la résistance à la translation est diminuée,

au début du mouvement, ce qui facilite le départ du projectile et évite un à-coup de pression.

Toutefois l'adoption des poudres sans fumée, très lentes, rendra moins avantageux l'emploi de la rayure progressive, parce que, pour ces poudres, la pression p_b diffère peu de P (*n° 161*).

164. Application. — Le rapport $\left(\frac{r}{b}\right)^2$ varie peu d'un projectile à l'autre, on pose généralement :

$$\left(\frac{r}{b}\right)^2 = 0{,}56.$$

Nous avons dit que le coefficient μ doit être déterminé de façon à tenir compte de toutes les résistances à la translation ; quand il est impossible de faire une mesure, on admet la valeur :

$$\mu = 0{,}167. \text{ (*)}$$

I. On donne :

la pression totale PS sur le culot, le coefficient μ, le rapport $\left(\frac{r}{b}\right)^2$, ainsi que l'inclinaison finale $\omega_2 = 4^\circ \frac{1}{2}$ d'une rayure uniforme, avec profil en dent de scie.

On demande :

de calculer les quantités Np_n et R ?

En opérant avec les formules complètes, on trouve :

$$Np_n = 0{,}04426\ PS,$$

$$R = 0{,}01083\ PS.$$

(*) Ces renseignements numériques sont extraits de l'ouvrage très remarquable de Kaiser. (Construction der gezogenen Geschützrohre).

En appliquant les formules simplifiées, on a :

$$Np_n = 0{,}04396\ PS.$$

$$R = 0{,}01079\ PS.$$

On peut donc, dans les applications, remplacer les relations complètes par les expressions simplifiées.

II. Dans un canon de 12c, le pas initial de la rayure est égal à 200 fois le diamètre du cylindre directeur et le pas final de la rayure est égal à 25 fois ce diamètre. On demande la valeur de ρ ?

On a d'abord :

$$\operatorname{tg} \omega_m = \frac{\operatorname{tg} \omega_1 + \operatorname{tg} \omega_2}{2};$$

mais, en vertu de la relation (71), on obtient :

$$\operatorname{tg} \omega_2 = \frac{\pi}{h_2}$$

et

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{\pi}{h_1},$$

h_2 étant le pas final et h_1 le pas initial de la rayure, exprimés en prenant le diamètre $2b$ comme unité.

On peut donc écrire :

$$\operatorname{tg} \omega_m = \frac{\pi}{2}\left(\frac{h_1 + h_2}{h_1 h_2}\right);$$

et en remplaçant les lettres par leurs valeurs numériques, on trouve :

$$\operatorname{tg} \omega_m = \frac{3{,}14}{2}\left(\frac{200 + 25}{200 \,.\, 25}\right) = 0{,}0706.$$

Quant à la valeur de ρ, elle est donnée par la relation :

$$\rho = \left(\frac{b}{r}\right)^2 (tg\ \omega_m + \mu)\ tg\ \omega_m,$$

ou

$$\rho = 0{,}56\ (0{,}0706 + 0{,}167)\ 0{,}0706 = 0{,}0094.$$

III. Dans un obusier de 15c, le pas initial de la rayure est égal à 125 fois le diamètre du cylindre directeur et le pas final est égal à 25 fois ce diamètre. Quelle est la valeur de ρ ?

On trouve :

$$\rho = 0{,}56\ (0{,}0754 + 0{,}167)\ 0{,}0754 = 0{,}0102.$$

On voit que la valeur de ρ diffère toujours peu de *0,01*.

§ 9.

Applications des lois du mouvement du projectile dans l'âme.

165. Récapitulation des formules principales.

Dans tous les calculs nous adopterons les unités fondamentales suivantes :

unité de longueur.	le décimètre ;
unité de force	le kilogramme ;
unité de temps.	la seconde.

Les principales formules appliquées sont :

$$Nd \cdot \frac{4}{3}\pi Z^3 = 1 \qquad \text{ou} \qquad 4{,}187 \,.\, NdZ^3 = 1.$$

$\frac{V_c}{X} = S$; dans le calcul de V_c on fera abstraction des rayures.

$$\frac{V_0 - \eta Q}{S} = \lambda.$$

$$v_1 = \frac{(1-\rho)\,SfZ}{m\varphi} = \frac{g\,(1-\rho)\,SfZ}{a\varphi} = 98{,}1 \cdot \frac{(1-\rho)\,SfZ}{a\varphi},$$

a étant le poids du projectile et g l'accélération de la pesanteur.

$$A = \frac{(n-1)\,(1-\rho)\,S^2fZ^2}{mQ\varphi^2} = (n-1)\,g \cdot \frac{(1-\rho)\,S^2fZ^2}{aQ\varphi^2}$$

$$= 10{,}79\,\frac{(1-\rho)\,S^2fZ^2}{aQ\varphi^2}.$$

$$P = \frac{fQ}{S\lambda} F(u_m) \left[1 - AM(u_m)\right]^{\frac{n}{n-1}} = \frac{fQ}{S\lambda} B.$$

$$AM(1) = 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x_1}\right)^{n-1} = 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x_1}\right)^{0,11}.$$

$$v_0^2 = \frac{2g}{n-1} \cdot \frac{1-\rho}{a} \cdot f\left\{Q\left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + X}\right)^{n-1}\right] - AQ\left[\frac{2M(1) - 1}{2}\right]\right\}$$

$$= 1784 \cdot \left(\frac{1-\rho}{a}\right) f\left\{Q\left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + X}\right)^{0,11}\right] - AQ\left[M(1) - 0,5000\right]\right\}.$$

166. On donne, pour l'obusier de 15^c, modèle 1890, les éléments suivants :

Volume de la chambre à poudre, V_0	3,107000
Volume de l'âme, depuis la position initiale du projectile jusqu'à la tranche de la bouche, V_c.	32,533404
Distance de la position initiale du culot du projectile à la tranche de la bouche, X. . . .	18,42
Coefficient tenant compte des résistances, ρ . .	0,0102
Force spécifique de la poudre noire, à grains irréguliers de 6 à 10^{mm}, f	261500
Vitesse spécifique de combustion de cette poudre, φ	18,22
Covolume des produits de la combustion, η . .	0,602
Densité réelle de la poudre, d	1,660
Nombre de grains au kilogramme, N	2500
Poids de la forte charge, Q	2,800
Poids du projectile, a	31,500

On demande :

1° Le rayon Z du grain sphérique équivalent au grain de forme irrégulière ?

On a :

$$4,187 \,.\, NdZ^3 = 1$$

ce qui donne :

$$Z = \sqrt[3]{\frac{1}{Nd \,.\, 4,187}} = \sqrt[3]{\frac{1}{2500 \,.\, 1,660 \,.\, 4,187}} = 0,0386 \ (d).$$

2° La section réduite de la bouche à feu et la longueur réduite de la chambre à poudre ?

On obtient :

$$S = \frac{V_c}{X} = \frac{32,533404}{18,42} = 1,7662 \ (d^2),$$

et

$$\lambda = \frac{V_0 - \eta Q}{S} = \frac{3,107000 - 0,602 \,.\, 2,800}{1,7662} = 0,80 \ (d).$$

3° La vitesse du projectile au moment où finit la combustion de la charge ?

On trouve :

$$v_1 = 98,1 \frac{(1-\rho)\, SfZ}{a\varphi} = 98,1 \frac{0,9898 \,.\, 1,7662 \,.\, 261500 \,.\, 0,0386}{31,500 \,.\, 18,22}$$
$$= 3015 \ (d - s) \ ;$$

soit :

$$v_1 = 301,5 \ (m - s.$$

4° La valeur du coefficient de tir ?

On obtient :

$$A = 10,79 \cdot \frac{(1-\rho)\, S^2 f Z^2}{a Q \varphi^2}$$

$$= 10,79 \frac{0,9898 \,.\, \overline{1,7662}^2 \,.\, 261500 \,.\, \overline{0,0386}^2}{31,5 \,.\, 2,800 \,.\, \overline{18,22}^2} = 0,1432.$$

5° La pression minimum des gaz ?

On a :

$$P = \frac{fQ}{S\lambda} B.$$

Connaissant A, la table (*n° 209*) donne la quantité B par la proportion :

$$\frac{0,4520 - 0,4432}{0,4520 - 0,3371} = \frac{B - 0,3797}{0,4455 - 0,3797};$$

d'où :

$$B = 0,3847;$$

et

$$P = \frac{261500 \,.\, 2,800}{1,7662 \,.\, 0,80} \cdot 0,3847 = 199375\,(K - d^2);$$

soit :

$$1994\,(K - c^2).$$

La moyenne des pressions mesurées à la culasse est de 1923 K . c².

Nous verrons (*n° 195*) que la différence entre la pression calculée et la pression mesurée, est de l'ordre de grandeur des erreurs de mesure.

6° L'épaisseur brûlée, au moment où se produit la pression maximum ?

On s'appuie sur la relation :

$$z_m = u_m Z.$$

Connaissant A, on trouve u_m à l'aide de la table (*n° 209*) et par la proportion :

$$\frac{0,4520 - 0,4432}{0,4520 - 0,3371} = \frac{u_m - 0,30}{0,35 - 0,30};$$

d'où :

$$u_m = 304,$$

et

$$z_m = 0,304 \times 0,0386 = 0,0117 \ (d) ;$$

soit :

$$z_m = 1,2 \ (mm).$$

7° Le poids de la poudre comburée, au moment où se produit la pression maximum ?

On part de la formule :

$$Q' = QF(u_m).$$

Connaissant A, la quantité $F(u_m)$ se déduit de la table (*n° 209*) par la proportion :

$$\frac{0,4520 - 0,4432}{0,4520 - 0,3371} = \frac{F(u_m) - 0,6570}{0,7354 - 0,6570}.$$

d'où :

$$F(u_m) = 0,6630,$$

et

$$Q' = 2,800 \ . \ 0,6630 = 1,856 \ (K).$$

8° Le chemin parcouru par le projectile pendant la combustion de la charge ?

On a :

$$AM(l) = 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x_1}\right)^{0,11}.$$

La table (*n° 209*) donne $M(1) = 0,6052$.

On trouve ainsi :

$$0,4432 \,.\, 0,6050 = 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + x_1}\right)^{0,11},$$

et du tableau (*n° 211*) on déduit :

$$\frac{\lambda + x_1}{\lambda} = 17,1,$$

d'où :

$$x_1 = \lambda \,.\, 16,1 = 0,80 \,.\, 16,1 = 12,88 \,.\, (d).$$

9° La vitesse initiale du projectile ?

On part de l'expression :

$$v_0^2 = 1784 \cdot \frac{1-\rho}{a} \cdot f\left\{ Q\left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + X}\right)^{0,11}\right] - AQ[M(1) - 0,5000] \right\}$$

En remplaçant les quantités par leurs valeurs, on obtient :

$$v_0^2 = 1784 \cdot \frac{0,9898}{31,5} \cdot 261500 \,.\, 0,6960 = \overline{3194}^2,$$

d'où :

$$v_0 = 3194 \ (d - s) ;$$

soit :

$$v_0 = 319,4 \ (m - s).$$

L'expérience a donné *322 m s.* (*)

(*) Table de tir de l'obusier de 15c A, modèle de 1890.

10° Le poids de la charge réduite, dont la combustion finit à la tranche de la bouche.

On a :

$$A_0 M(1) = 1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_0 + X}\right)^{0,11},$$

ou :

$$A_0 Q_0 M(1) = Q_0 \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_0 + X}\right)^{0,11}\right];$$

et en remarquant que $A_0 Q_0 = AQ$, il vient :

$$0,751036 = Q_0 \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_0 + X}\right)^{0,11}\right].$$

On ne peut déduire Q_0 de cette relation que par tâtonnements, parce que λ_0 dépend de Q_0.

On trouve ainsi, très approximativement,

$$Q_0 = 2^{k},600,$$

puisque pour cette valeur de Q_0, le second membre devient égal à $0,75101$.

En conséquence, toutes les charges de poids moindres que $2^{k},600$ ne se comburent plus entièrement dans l'âme.

11° La vitesse initiale correspondant à la charge réduite $1,600$?

Cette charge étant plus petite que $2^{k},600$, la formule (57) n'est plus applicable.

Pour obtenir cette vitesse initiale, on détermine d'abord la valeur de u qui correspond au parcours X, par la relation :

$$A_{1,6} M(u) = 1 - \left(\frac{\lambda_{1,6}}{\lambda_{1,6} + X}\right)^{0,11}, \qquad (89)$$

dans laquelle $A_{1,6}$ et $\lambda_{1,6}$ représentent respectivement le coefficient de tir et la longueur réduite de la chambre, pour la charge *1,600*.

$A_{1,6}$ se calcule par la proportion :

$$\frac{A_{1,6}}{A} = \frac{Q}{1,600},$$

on trouve ainsi :

$$A_{1,6} = 0,7756.$$

On a, d'autre part :

$$\lambda_{1,6} = 1,21,$$

et aussi :

$$1 - \left(\frac{\lambda_{1,6}}{\lambda_{1,6} + X}\right)^{0,11} = 0,26397.$$

La quantité $M(u)$ étant alors la seule inconnue dans l'équation (89), on trouve :

$$M(u) = \frac{0,26397}{0,7756} = 0,3405,$$

et en consultant la table (*n° 209*), on obtient pour u la valeur :

$$u = 0,688.$$

De la relation $v = v_1 u$, on déduit, en définitive :

$$v = 3015 \times 0,688 = 2074\,(d - s)\ ;$$

soit : $$v = 207\,(m - s).$$

167. On donne, pour le canon de *12 c. A*, modèle *1889*, les éléments suivants :

Volume de la chambre à poudre, V_0	4,747000
Volume de l'âme, depuis la position initiale du culot du projectile jusqu'à la tranche de la bouche, V_c	26,565000
Distance entre la position initiale du culot du projectile et la tranche de la bouche, X . .	23,00
Coefficient tenant compte des résistances passives, ρ	0,0094
Force spécifique de la poudre prismatique brune, à un canal, f . . . . . , ...	273600
Vitesse spécifique de combustion de cette poudre, φ	32,79
Covolume des produits de la combustion, η . .	0,570
Diamètre du cercle inscrit dans l'hexagone régulier formant la base du grain, $2R$	0,346
Diamètre du canal central, $2r$	0,096
Hauteur du grain	0,250
Poids de la charge, Q	4,700
Poids du projectile. a	20,000
Section réduite de l'âme, S	1,1550
Longueur réduite de la chambre à poudre, λ. .	1,85
Demi-épaisseur du grain, Z	0,0625

On demande :

1° Le coefficient de tir ?

On a :

$$A = 10,79 \frac{(1-\rho) S^2 f Z^2}{a Q \varphi^2} = 10,79 \frac{0,9906 \,.\, \overline{1,1550}^2 .\ 273600 \,.\, \overline{0,0625}^2}{20,000 \,.\, 4,700 \,.\, \overline{32,79}^2}$$

$$= 0,1490.$$

2° La pression maximum des gaz ?

On part de la relation :

$$P = \frac{fQ}{S\lambda} \cdot B.$$

Connaissant A, on obtient B à l'aide de la table (*n° 210*) et par la proportion :

$$\frac{0,1605 - 0,1490}{0,1605 - 0,1390} = \frac{B - 0,3428}{0,3774 - 0,3428},$$

d'où :

$$B = 0,3613,$$

et

$$P = \frac{273600 \,.\, 4,700}{1,1550 \,.\, 1,85} \cdot 0,3613 = 217439\,(K - d^2),$$

soit : $$2174\,(K - c^2).$$

La moyenne des pressions mesurées à la culasse est $2102\,(K - c^2)$.

3° La vitesse initiale ?

On a :

$$v_0^2 = 1784 \cdot \frac{1-\rho}{a} \cdot f\left\{Q\left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + X}\right)^{0,11}\right] - AQ[M(1) - 0,5000]\right\}$$

$$= 1784 \cdot \frac{0,9906}{20} \cdot 273600 \cdot 0,9510 = \overline{4795}^2,$$

d'où :

$$v_0 = 4795\,(d - s);$$

soit : $$v_0 = 479.5\,(m - s).$$

L'expérience donne *480*. (*)

(*) Table de tir du canon de 12c A, modèle 1889.

CHAPITRE V.

DU CHOIX DES POUDRES DE TIR.

---

§ 1.

Du rendement de l'arme à feu.

168. Nous avons dit qu'au point de vue balistique, l'arme à feu est une machine destinée à produire un certain effet utile, représenté par la force vive initiale de translation du projectile.

Si l'on compare cette force vive à l'énergie totale contenue dans le moteur, c'est-à-dire, dans la poudre, on obtient un rapport, nommé *rendement de l'arme à feu.*

Comme l'énergie emmagasinée dans le moteur est $U_0\ Q$, le rendement H a pour expression :

$$H = \frac{m\ v_0^2}{2\,U_0\,Q}.$$

Le calcul montre que, quelles soient l'arme à feu et la poudre, ce rendement varie, actuellement, entre *0,17* et *0,35* ; il est donc très faible comparativement aux rendements des machines industrielles. Mais le canon présente l'avantage de réaliser son effet utile en un temps extrêmement court, il est incomparable à ce point de vue spécial.

169. Le rendement de l'arme à feu est si petit, parce que de nombreuses causes interviennent pour dissiper l'énergie du moteur.

En effet, cette énergie est dépensée pour produire le forcement du projectile ; pour vaincre la résistance de l'air pendant le trajet de ce corps dans l'âme ; pour lui communiquer une force vive de rotation ; pour échauffer le canon ; pour provoquer le recul et pour engendrer les déformations élastiques de l'arme à feu ; enfin, lorsque le projectile arrive à la bouche, l'énergie conservée par les gaz est emportée dans l'atmosphère.

Parmi ces pertes, la dernière est la plus considérable. On a essayé, par divers moyens, d'utiliser les gaz au moment où ils vont s'échapper de l'arme à feu ; par exemple, pour limiter le recul de la pièce. Jusqu'à présent on n'est arrivé à aucune solution pratique.

170. Nous donnons, dans le tableau suivant, les valeurs du rendement, pour la poudre noire tirée dans l'obusier de *15c A, modèle 1890 (belge)*, et pour la poudre sans fumée (Blättchenpulver), tirée dans le canon de campagne, *modèle 1891 (allemand)*.

DÉSIGNATION DE L'ARME A FEU.	Poids du projectile. Kilog.	Vitesse initiale. m — s	Nature de la poudre.	Poids de la charge. Kilog.	Energie spécifique de l'explosif. Tonne-mètres	Travail utile de la poudre. Tonne-mètres	Rendement.
Obusier de 15cA, modèle 1890 (belge).	31,500	322	Poudre noire à grains irréguliers de 6 à 10mm.	2,800	311	166	0,19
Canon de campagne, modèle 1891 (allemand).	7,45	442	Poudre sans fumée. Blättchenpulver.	0,640	356	74,2	0,33

171. Le rendement dépend de l'arme à feu, de la poudre et du projectile. Il peut être considéré comme le critérium de la valeur économique de la machine ; on doit chercher à le rendre aussi grand que possible, sans nuire aux conditions de service.

Il ne permet point d'apprécier les qualités de l'arme à feu, au point de vue de son emploi à la guerre ; en effet, si dans un canon de campagne on poussait le rendement à l'extrême, en augmentant outre mesure la vitesse initiale, on arriverait à une conception sans valeur pratique, parce que, les divers organes à mettre en œuvre, pour maintenir le recul dans des limites acceptables, donneraient à la pièce un poids excessif. Si, pour un canon de coupole, on cherchait l'augmentation du rendement par l'allongement de l'âme, il faudrait alors se résoudre à donner à l'ouvrage des dimensions considérables, ou admettre la saillie de la bouche à feu sur la calotte de la coupole.

Il est évident que ces défauts graves ne peuvent être compensés par l'avantage résultant d'un surcroit du rendement.

Ainsi, il faut bien se garder de prétendre qu'il y a toujours un avantage à majorer le rendement d'une arme à feu. La question est très complexe, elle doit être examinée sous trois aspects ; il est nécessaire de mettre en balance des conditions de balistique, de construction et de tactique, et pour les concilier on procède toujours par voie de comparaison.

---

§ 2.

Des moyens à mettre en œuvre pour obtenir le plus grand effet utile des poudres, lorsque l'arme à feu et le projectile sont déterminés.

172. En agissant sur les parois de l'arme à feu les gaz créent des déformations dans le métal.

Lorsque les pressions cessent, ces déformations disparaissent, et le tube reprend ses dimensions premières, pour autant que la pression maximum P n'ait point franchi une valeur P_l, que nous nommerons *pression limite.*

Dans le cas contraire, le tube subit une déformation permanente qui peut nuire au centrage du projectile et à la résistance de l'arme à feu.

De ces considérations il résulte, qu'en toutes circonstances, la condition :

$$P \overline{\overline{<}} P_l$$

doit être satisfaite.

Dans cette étude nous supposerons la quantité P_l connue (*).

173. L'arme à feu et le projectile étant donnés dans tous leurs détails, les éléments dont on dispose, pour modifier la pression maximum des gaz et la vitesse initiale du projectile, peuvent être rangés en deux catégories.

Nous classons, d'une part, les quantités caractérisant la nature de la poudre et la forme du grain, savoir :

(*) Les constructeurs adoptent, on le sait, une pression limite bien inférieure à celle qui amène une déformation permanente du canon.

la force spécifique f;

la vitesse spécifique de combustion φ;

la fonction de forme $F(u)$.

Nous mettons, d'autre part, les quantités représentant l'épaisseur du grain et le poids de la charge.

Les premières, qui sont qualitatives, seront choisies de manière à convenir pour toutes les armes à feu en service et quel que soit le projectile; on obtiendra ainsi l'unité dans l'approvisionnement des poudres.

Les secondes, qui sont quantitatives, seront calculées de façon à approprier la poudre, déterminée par sa nature chimique et la forme de son grain, aux conditions particulières du tir des diverses armes.

174. Choix des éléments qui caractérisent la nature de la poudre et la forme du grain.

Lorsqu'on met en œuvre différentes poudres, en laissant invariables le poids de la charge, l'épaisseur du grain et le volume de la chambre, on admet que la meilleure de ces poudres est celle qui communique, à une masse donnée, la plus grande impulsion $\int_0^T p\,dt$ avec la plus petite pression maximum.

Cela étant, nous pouvons déduire des considérations antérieures (*n*os *41* et *76*), ce qui suit :

1° la force spécifique de la poudre doit être aussi élevée que possible;

2° la vitesse spécifique de combustion doit être réduite dans la plus grande mesure;

3° la meilleure forme du grain est celle qui donne la plus petite valeur à $F(u)$, pour un même u.

Remarque. — Si les formes en tube et en lamelle sont à peu près équivalentes, au point de vue balistique, le grain lamellaire $\left(l = \frac{1}{10}\right)$ a non seulement l'avantage d'être d'une fabrication aisée, mais de convenir à toutes les armes à feu; c'est donc ce grain qu'il faut préconiser. *

(*) Voir la note V.

175. Détermination du poids de la charge et de l'épaisseur du grain. — Il s'agit maintenant d'approprier la poudre choisie, à l'arme à feu et au projectile donnés, en agissant sur le poids Q de la charge et sur l'épaisseur $2Z$ du grain.

Dans ce but, on calcule Q et Z à l'aide des équations suivantes (*n*os *120* et *117*) :

$$P_l = \frac{fQ}{S\lambda} F(u_m) \left[1 - AM(u_m)\right]^{\frac{n}{n-1}}$$

et

$$\left(\frac{\lambda}{\lambda + X}\right)^{n-1} = 1 - AM(1),$$

obtenues en égalant les quantités P et x_1 à leurs limites respectives ; on a d'ailleurs :

$$A = \frac{(n-1)(1-\rho) S^2 f^2 Z^2}{mQ\varphi^2}.$$

Lorsqu'on procède de cette manière, la combustion de la charge s'achève à la tranche de la bouche à feu, et la vitesse initiale acquiert la plus grande des valeurs compatibles avec la résistance du canon. En effet, si l'on cherche à majorer cette vitesse, en augmentant Q ou en réduisant Z, on obtient :

$$P > P_l ;$$

et si, dans le même but, on accroît concurremment Q et Z, de manière à conserver la même pression maximum, on constate, par le calcul numérique, que la combustion ne se fait plus entièrement dans l'âme.

176. Quand une bouche à feu tire des charges de poids différents, on ne peut plus déterminer la forte charge et l'épaisseur du grain, comme nous venons de le dire, si toutefois, pour obtenir des effets plus

réguliers, on désire que toutes les charges se comburent complètement dans le canon.

On calculera alors la charge normale et l'épaisseur $2Z$, par les formules :

$$P_l = \frac{fQ}{S\lambda} F(u_m) \left[1 - AM(u_m)\right]^{\frac{n}{n-1}}$$

et

$$\left(\frac{\lambda}{\lambda + x_1}\right)^{n-1} = 1 - AM(1) ;$$

quant à la quantité x_1, elle s'obtiendra en admettant la relation :

$$x_1 = \frac{X}{k},$$

k désignant le nombre des charges de la bouche à feu. Ainsi, la forte charge sera comburée après le parcours x_1 du projectile, et la plus petite des charges sera brûlée après le déplacement X (*).

177. Comme les dimensions des grains dépendent du canon, leur variété s'impose ; mais, doit-elle être en rapport avec la multiplicité des armes à feu ?

Une grande diversité dans les poudres est évidemment une complication dans le service des batteries ; il n'est point pratique d'admettre un grain spécial pour chaque canon ; il est préférable d'utiliser le même produit dans un certain nombre de pièces.

Si les bouches à feu d'un même système d'artillerie sont construites d'après les principes de la similitude, on peut facilement pallier à l'inconvénient, en choisissant pour toutes les armes à feu de ce système, l'épaisseur du grain convenant à l'arme de calibre moyen.

(*) Lorsque des charges de poids différents, composées de grains identiques, se comburent dans la même arme à feu, c'est à la plus forte des charges que correspond la plus petite valeur de x_1, parce que la vitesse de combustion croit avec la pression des gaz ; du reste, cette conséquence peut se déduire de l'examen de la formule (50).

§ 3.

Influence des éléments de l'arme à feu et du projectile sur l'effet utile.

178. Nous avons vu de quelle manière on choisit la poudre, lorsque le canon et le projectile sont donnés ; nous allons examiner maintenant comment on détermine les éléments essentiels de l'arme à feu et de son projectile, quand la poudre est connue.

Les caractéristiques sur lesquelles on peut agir pour accroître l'effet utile, sont :

1° le calibre et la longueur du projectile ;

2° la longueur d'âme du canon ;

3° la nature du métal et le mode de construction de l'arme ;

4° le volume de la chambre à poudre.

Comme nous le verrons plus loin, le volume de la chambre à poudre est un élément sur lequel le constructeur a peu d'action, lorsqu'il doit élaborer une pièce à grande force vive initiale.

Quant aux autres caractéristiques, elles sont généralement mises toutes en cause, mais la part contributive de chacune d'elles varie avec l'état des progrès de la construction du matériel, de la métallurgie et des poudres.

Pour fixer les idées, nous considérerons les diverses étapes de la transformation du canon de côte ; nos conclusions pourront d'ailleurs s'étendre à d'autres bouches à feu.

179. Les grandes forces vives initiales peuvent être obtenues en suivant trois voies principales.

On peut chercher à accroître la puissance du canon par l'augmentation du calibre, sans modification de la pression maximum et de la vitesse initiale.

Mais l'accroissement du calibre entraîne nécessairement une augmentation du poids de la pièce et du poids du projectile. Cette solution est donc à condamner dans tous les systèmes d'artillerie (artillerie de campagne ; artillerie de montagne, etc.), où la légèreté et la mobilité du matériel sont des qualités indispensables.

C'était autrefois le seul moyen à la disposition de l'artillerie de côte, dans la lutte du canon contre la cuirasse. A une cuirasse plus épaisse ou plus résistante, on ne savait opposer qu'un canon de calibre plus fort.

En s'engageant dans cette voie on était arrivé, en France notamment, à un calibre de 42c.

Dans le tableau suivant nous donnons quelques exemples de l'accroissement des poids des bouches à feu et des projectiles, résultant de l'augmentation des calibres.

DÉSIGNATION DES BOUCHES A FEU.		CANONS DE CÔTE de l'artillerie française.		CANONS DE COUPOLE de l'artillerie de forteresse belge.	
		CANON DE 240mm	CANON DE 270mm	CANON DE 12c	CANON DE 15c
Longueur totale.	mm.	7220	8266	3000	3750
Longueur d'âme.	cal.	28,5	28,5	25	25
Poids de l'obus de rupture.	K.	144	216	20	39
Poids de la charge de tir.	K.	62	84	4,700	9
Vitesse intiale.	m. s.	600	600	480	480
Poids de la pièce.	K.	20000	30000	1430 (canon avec appareil de fermeture)	3060 (canon avec appareil de fermeture)

180. Aujourd'hui une évolution se manifeste dans les procédés ; on veut réaliser de grandes forces vives initiales sans recourir aux calibres extrêmes. On a plutôt une tendance à réduire le calibre et à augmenter le poids ainsi que la vitesse du projectile.

Cette solution est plus logique. En effet, si l'on envisage d'abord le côté balistique, la réduction du calibre est avantageuse, puisque la

pénétration d'un projectile dans un obstacle varie en raison inverse du carré du calibre, pour une même force vive au choc.

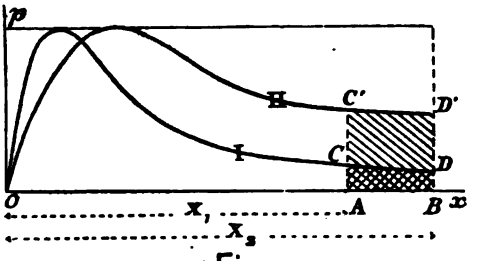
Si l'on considère maintenant le côté économique et les conditions de service, l'avantage est plus considérable encore. Il est évident que des canons de très forts calibres sont malaisés à construire, et par conséquent ils coûtent cher. Ils sont difficiles à installer, à protéger et à pointer, sans l'intervention d'organes compliqués.

Nous venons de dire qu'actuellement on agit moins sur le calibre que par le passé ; on préfère augmenter le poids du projectile en allongeant celui-ci, et accroître la vitesse initiale en allongeant la bouche à feu.

Pour réaliser cette idée, il a fallu apporter des modifications dans l'organisation des projectiles (substituer la ceinture de cuivre à la chemise de plomb) et dans la fabrication des poudres.

En effet, un projectile plus long nécessite une vitesse angulaire plus grande et partant des tenons plus résistants. Une bouche à feu plus longue n'est profitable que si l'on met en œuvre une poudre moins vive, et une charge assez forte pour conserver la même pression maximum.

Ainsi, pour un allongement AB du canon, (fig. 27) l'aire de la courbe des pressions augmente de $ABCD$ ou de $ABC'D'$, suivant que le tir se fait avec la poudre vive ou avec la poudre lente, poudres auxquelles correspondent respectivement les diagrammes I et II.



(Fig. 27)

Cette solution du problème n'est pas sans défaut : les bouches longues sont encombrantes, elles exigent des installations spacieuses.

Le tableau suivant permet d'apprécier les résultats atteints, en cherchant l'accroissement de la force vive initiale, par l'allongement du projectile et de la bouche à feu.

CANONS KRUPP DE 24c (*).

ANNÉE DE FABRICATION.	LONGUEUR DE LA BOUCHE A FEU. calibre.	POIDS DE LA BOUCHE A FEU. tonne.	CHARGE DE TIR. kilog.	POIDS DU PROJECTILE. kilog.	VITESSE INITIALE. m. s.	EFFET UTILE. t. m.
1868	20	14,65	22,5 poudre noire à grains irréguliers	152,5	351	978
1884	30	19,00	72 poudre prismatique brune à un canal	215	549	3303
1890	40	31,00	42 poudre sans fumée	215	700	5370

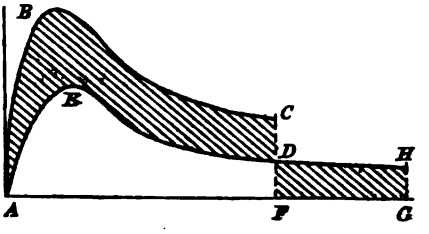
181. Selon nous, la méthode la plus rationnelle, est celle qui permet de réaliser de grandes forces vives initiales avec des bouches à feu relativement courtes et légères. Elle repose sur l'emploi de hautes pressions, elle exige un métal choisi, un mode de construction perfectionné; elle a été préconisée, notamment par Longridge.

Il est facile de montrer qu'on peut gagner plus de force vive en tirant à haute pression, qu'en tirant à moyenne pression et en allongeant la bouche à feu (fig. 28).

Par l'allongement de l'âme, on accroît l'aire déterminée par la courbe des pressions, d'une quantité *FGHD*; par l'élévation des

(*) Ces renseignements numériques sont extraits de l'excellent ouvrage « Waffenlehre », du Général Wille.

pressions, cette aire augmente de *ABCDE* et il est facile de rendre celle-ci supérieure à la première.



(Fig. 28)

Dans les anciens canons en bronze, la pression maximum ne pouvait s'élever à plus de *1800* kilogrammes par centimètre carré ; dans les bouches à feu en acier, frettées, elle excède exceptionnellement *2500* k-c² ; aujourd'hui, une pression de *4700* k-c² n'a rien d'excessif, mais pour qu'une arme à feu puisse la supporter il faut que le constructeur s'engage résolument dans une direction nouvelle ; il devrait adopter, par exemple, le frettage dit à fils d'acier. (*)

Pression maximum	atm.	2755 frettage ordinaire	4670 frettage à fils d'acier
calibre ;	mm	304,8	304,8
poids du projectile ;	K	408,2	408,2
poids de la charge de poudre sans fumée ;	K	67,45	66,85
longueur totale de la bouche à feu ;	m	8,34	6,16
vitesse initiale ;	m. s.	629,1	696,5
force vive initiale ;	t. m.	8230	10086

Ce frettage spécial permet d'élever considérablement la pression, comme le prouve le tableau ci-dessus, et cela, pour arriver à une augmentation considérable de la force vive initiale, malgré une réduction notable de la longueur d'âme.

(*) L'emploi de l'acier-nickel dans la construction des bouches à feu constitue un progrès considérable ; c'est une étape vers la réalisation d'une artillerie légère et à haute pression.

182. Influence du volume de la chambre à poudre. — Dans les considérations antérieures nous avons indiqué la voie à suivre, pour déterminer le calibre, la longueur d'âme, le métal et le mode de construction de l'arme à feu, il nous reste à examiner l'influence du volume de la chambre à poudre sur l'effet utile.

Si, toutes choses égales d'ailleurs, on diminue le volume V_0 de la chambre à poudre, on accroit la pression maximum des gaz ainsi que la vitesse initiale du projectile, puisque la quantité λ diminue.

On pourra donc calculer cette quantité, et partant V_0, de manière à obtenir une pression maximum déterminée, avec une charge donnée.

L'avantage résultant de l'emploi des hautes tensions se manifeste encore ici, surtout pour les bouches à feu à tir rapide, se chargeant à l'aide de douilles, dont il faut réduire les dimensions, pour faciliter le service.

Connaissant le poids de la charge et le volume de la chambre, on en déduit la densité de chargement Δ.

On trouve généralement, dans le cas du tir des canons :

pour les poudres noire et brune, $\Delta = 0{,}900$;

pour les poudres sans fumée, $\Delta = 0{,}600$. (*)

(*) C'est la densité de chargement qui a été adoptée dans l'ancien armement, quand il s'est agi de substituer la poudre sans fumée aux poudres noire et brune.

Dans les armes à feu conçues pour le tir des poudres nouvelles, on donne à Δ une plus grande valeur ; elle dépend de la pression limite.

§ 4.

Les améliorations des poudres de tir.

183. Dans les considérations analytiques précédentes, nous avons indiqué la marche à suivre pour améliorer les poudres, au point de vue balistique, sans nous préoccuper des difficultés inhérentes à la fabrication et à la conservation.

Nous allons examiner maintenant quels sont les obstacles qu'il a fallu vaincre, pour arriver au niveau actuel des progrès.

184. Exposons d'abord les phases de l'évolution des poudres pour bouches à feu.

Avant l'invention des canons rayés, on n'employait généralement qu'une seule espèce de poudre pour toutes les bouches à feu, c'était la poudre noire à faible densité réelle, à grains irréguliers de $1^{mm},5$ à $2^{mm},5$.

Quand vinrent les bouches à feu rayées, on reconnut que cette substance était trop vive pour tirer des projectiles forcés, et plus lourds que par le passé.

Les premiers essais, faits en vue de remédier à cet inconvénient, eurent comme conséquence une augmentation de la densité réelle et de la grosseur des grains.

Lorsqu'on fit des canons de forts calibres, pour précéder à la destruction des cuirassements, la poudre modifiée fut encore reconnue trop vive.

On songea alors à substituer à la forme irrégulière des grains une forme géométrique, et on modifia le dosage du mélange, ainsi que la nature du charbon de bois ; le charbon de bois noir fut remplacé par un charbon roux, moins carbonisé. On réalisa par ces moyens, en

Allemagne, la poudre prismatique brune, dont l'usage se répandit à l'étranger.

Pour produire avec cette poudre de grandes forces vives initiales, on fut amené à augmenter la longueur du canon et le poids de la charge. Mais il fut impossible d'aller bien loin dans cette voie : comme nous l'avons dit, l'allongement de la bouche à feu crée de grandes difficultés d'installation, et l'augmentation du poids des charges de tir entraîne un surcroît de fatigue pour l'affût.

Ainsi, on se trouvait arrêté, pour des raisons de service et de résistance.

Le progrès le plus marquant est dû à l'invention des poudres fortes, lentes, non encrassantes, connues sous le nom générique de poudres sans fumée.

Nous montrerons qu'elles produisent le même effet utile, avec une charge plus faible et une pression maximum moins élevée *(n° 193)*.

La première poudre sans fumée fut inventée en France, vers 1886, par Vieille ; c'est une poudre à base de nitrocellulose. (*)

Cette découverte importante fut suivie de recherches, entreprises dans différents pays.

En 1888, un Suédois, Alfred Nobel, inventa une autre poudre sans fumée, à base de nitrocellulose et de nitroglycérine.

Actuellement il existe un grand nombre de poudres sans fumée, elles dérivent généralement de la poudre Vieille ou de la poudre Nobel.

Les poudres à base de nitroglycérine et de nitrocellulose présentent, au point de vue balistique, des avantages sur les poudres à base de nitrocellulose pure, comme le prouvent les résultats suivants des expériences faites en Russie, mais on leur adresse le reproche de

(*) Dans la note I, nous exposons quelques considérations historiques sur les poudres sans fumée.

produire plus rapidement des érosions dans les armes à feu et d'être moins stables. (*)

POUDRE EMPLOYÉE.		Fusil russe ; calibre 7mm62.			Canon de campagne russe ; calibre 87mm.		
		Charge. gr.	Vitesse initiale. m. s.	Pression maximum. atm.	Charge. gr.	Vitesse initiale. m. s.	Pression maximum. atm.
A base de nitroglycérine	balistite.	2,00	615	2250	629	525	1350
	cordite.	2,85	615	2550			
Maxim, ne contenant que 5 % de nitroglycérine		1,95	615	2800			
A base de nitrocellulose.	poudre Vieille.	2,45	615	2700	715	525	1400

185. Dans les armes à feu portatives la question de l'amélioration des poudres se présente sous un autre aspect.

Jusqu'en 1886 on n'eut, dans les divers pays, qu'une seule espèce de poudre pour fusils, c'était la poudre noire à grains irréguliers de 1^{mm} à $1^{mm},5$.

Lorsqu'on voulut réduire le calibre de l'arme à feu portative, en vue d'accroître la tension de la trajectoire, on fut arrêté principalement par des difficultés inhérentes à la poudre.

On reconnut notamment que la poudre noire manquait de force spécifique pour réaliser une grande vitesse initiale, avec une charge faible. Il fallut attendre les résultats des remarquables travaux de Vieille, pour obtenir, avec une charge moindre et une balle plus légère que dans le passé, une plus grande force vive initiale.

Actuellement toutes les puissances emploient des poudres sans fumée ; la Belgique possède la poudre « L^3 de Wetteren ».

(*) Voir, pour les détails, la note III.

186. Tableau des poudres de tir en usage en Belgique.

1° Poudre d'infant^rie. P.I.I.	Composition chimique. { salpêtre 75. soufre 12. charbon de bois 13. Densité gravimétrique : 0,900 à 0,930. Densité réelle : 1,563 à 1,588. Forme du grain : irrégulière. Grosseur : 1mm à 1mm5.
2° Poudre d'artillerie à grains ordinaires. P. O.	Composition chimique. { salpêtre 75. soufre 12. charbon de bois 13. Densité gravimétrique : 0,920 à 0,950. Densité réelle : 1,563 à 1,588. Forme du grain : irrégulière. Grosseur : 1mm5 à 2mm5.
3° Poudre d'artillerie à gros grains. P. G.	Composition chimique. { salpêtre 74. soufre 10. charbon de bois 16. Densité gravimétrique : 0,960 à 0,990. Densité réelle : 1,653 à 1,678. Forme du grain : irrégulière. Grosseur : 6mm à 10mm.
4° Poudre noire à grains prismatiques. P. P. N.	Composition chimique. { salpêtre 74. soufre 10. charbon de bois 16. Densité réelle : 1,750. Forme du grain : prisme droit à base hexagonale, percé d'un canal central. Dimensions : { hauteur : 25mm. diamètre du cercle inscrit : 34mm6. diamètre du canal central : 9mm6.
5° Poudre brune à grains prismatiques. P. P. B.	Composition chimique. { salpêtre 80. soufre 3. charbon roux 17. Densité réelle : 1,755. Forme du grain : prisme droit à base hexagonale, percé d'un canal central. Dimensions : { hauteur : 25mm. diamètre du cercle inscrit : 34mm6. diamètre du canal central : 9mm6.
6° Poudre sans fumée. (A l'essai). L^s de Wetteren.	Composition chimique. { à base de nitrocellulose. Pour fusil Mauser : { densité gravimétrique : 0,680. densité réelle, 1,479. forme du grain : lamelle. Pour canons de campagne. { forme du grain : lamelle. dimensions : 5mm, 5mm, 0mm7.

187. Tableau des poudres de tir sans fumée en usage à l'étranger.

France.	Poudre B.	A base de nitrocellulose. Densité réelle : 1,580. Forme et dimensions des grains. — Pour fusils : grains en lamelles de 2 à 3mm de côté et 0mm3 d'épaisseur. Pour bouches à feu : grains en bandelettes ; la longueur et l'épaisseur varient avec le type de bouche à feu.
Allemagne.	Blättchenpulver.	A base de nitrocellulose. Forme et dimensions des grains. — Pour fusils : grains en lamelles de 1mm5 de côté et de 0mm2 d'épaisseur. Pour canon de campagne : grains en lamelles de 2mm7 de côté et de 0,4 à 0mm5 d'épaisseur.
	Würfelpulver.	A base de nitroglycérine (90 °/o) et de nitrocellulose (10 °/o). Densité réelle : 1,600. Forme et dimensions des grains. — Grains cubiques dont les dimensions varient avec le type de bouche à feu (Sge et Pce).
Angleterre.	Cordite.	A base de nitroglycérine et de nitrocellulose. Forme et dimensions des grains. — Pour fusils : cordes de 0mm85 à 0mm88 de diamètre et de 36mm de longueur. Pour bouches à feu : cordes de diamètres et de longueurs variables avec le type de bouche à feu.
Italie.	Balistite.	A base de nitroglycérine et de nitrocellulose.
Russie.	Pyrocollodion.	A base de nitrocellulose.
Autriche.	Poudre mle 1892.	A base de nitrocellulose. — Pour armes portatives.
	Poudre mle 1895.	A base de nitroglycérine et de nitrocellulose. — Pour bouches à feu.

§ 5.

Épreuves de réception des poudres de tir.

188. On soumet les poudres de tir à des épreuves, dans le but de constater leur état physique, leur composition chimique et leurs propriétés balistiques.

Ces épreuves sont définies par un règlement ; elles sont faites par une commission de réception composée d'officiers d'artillerie.

189. On se rend compte des qualités physiques d'une poudre en examinant celle-ci au point de vue : de l'aspect qu'elle présente sous le rapport de la couleur, du lissage, et de la netteté des arêtes ; de la dureté et des dimensions des grains ; de la densité gravimétrique ; de la densité réelle et enfin, du nombre de grains contenus dans un poids déterminé de poudre.

190. Les épreuves relatives à la composition chimique ont pour but de déterminer : la proportion des éléments composants ; la quantité d'eau et le degré de pureté des matières premières.

191. Pour apprécier les qualités balistiques des poudres de tir, on fait deux épreuves que nous nommerons : *épreuve de puissance*, *épreuve de régularité*.

L'épreuve de puissance sert à apprécier la poudre au point de vue de l'effet utile ; l'épreuve de régularité a pour objet de s'assurer si elle produit des effets constants.

Indiquons de quelle manière on procède à ces épreuves.

192. Épreuve de puissance. — Pour estimer judicieusement les qualités d'une poudre, au point de vue de l'effet utile, on la

compare à la meilleure poudre en service, en tirant les deux substances dans la même arme à feu et avec le même projectile.

On détermine par expérience, les charges réalisant la même vitesse initiale, et l'on forme ensuite le rapport de leurs poids ; nous le nommerons *rendement relatif*.

193. Le tableau suivant donne les rendements relatifs des principales poudres sans fumée.

PAYS.	Arme à feu.	Espèce de poudre noire.	Poids de la charge. kil.	Vitesse initiale. m — s	Espèce de poudre sans fumée.	Poids de la charge. kil.	Rendement relatif de la poudre sans fumée et de la poudre noire.
Belgique.	Canon de 8c,7 de campagne.	Poudre à grains irréguliers de 6-10mm.	1,500	458	L3 de Wetteren.	0,540	1 : 2,78
France.	Canon de 90mm de campagne, modèle 1877.	Poudre C.	1,900	432	Poudre BC en lamelles.	0,720	1 : 2,67
Allemagne.	Canon de 8c,7 de campagne, modèle 73/91.	Poudre à grains irréguliers de 6-10mm.	1,500	432	Poudre en lamelles. (Blättchen-pulver).	0,640	1 : 2,34
Italie.	Canon de 9c de campagne, modèle 1881.	Poudre à grains irréguliers de 7 à 11mm.	1,450	455	Balistite.	0,460	1 : 3,15
Angleterre.	Canon de 12p de campagne, modèle 1884.	Poudre à grains irréguliers de 9,5 à 19mm.	1,815	524	Cordite.	0,496	1 : 3,66
Autriche-Hongrie.	Canon de 9c de campagne, modèle 75/30.	Poudre en dés de 7mm.	1,500	450	Poudre en dés de 2mm. (Geschütz-pulver).	0,440	1 : 3,64

De l'examen de ce tableau on peut conclure, qu'avec une charge de poudre sans fumée on obtient, dans une arme à feu déterminée, le même effet utile qu'avec une charge de poudre noire à peu près trois fois plus forte.

194. Épreuve de régularité. — Pour faire cette épreuve on tire plusieurs coups, dans les mêmes conditions apparentes, et l'on mesure à chaque coup :

1° La vitesse du projectile *(n° 199)* à *49,50* et à *50,50* de l'arme à feu, ce qui permet de calculer l'erreur quadratique moyenne des vitesses mesurées par rapport à la moyenne arithmétique de ces vitesses, c'est-à-dire, à la vitesse moyenne.

Ainsi, soient v_1, v_2, v_3, . . . v_n les vitesses mesurées ; v_o la moyenne arithmétique de ces vitesses et ε l'erreur quadratique moyenne.

On aura :

$$v_o = \frac{v_1 + v_2 + v_3 \ . \ . \ . + v_n}{n}$$

et

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(v_o - v_1)^2 + (v_o - v_2)^2 \ . \ . \ . \ (v_o - v_n)^2}{n}}.$$

2° La pression maximum des gaz à la culasse ; ce qui permet de calculer la moyenne arithmétique P_o des pressions menées, ainsi que la différence $P_s - P_o$, P_s étant la plus forte pression constatée *(n° 207)*.

195. A titre d'exemple nous donnons ci-après, les détails relatifs à l'épreuve de régularité d'un échantillon de poudre noire, à grains irréguliers de 6-10^{mm}.

Résultats du tir :

MESURES DES VITESSES.										MESURES DES PRESSIONS.						
Numéro d'ordre des coups.	Distance de la tranche de la culasse au culot du projectile.		Vitesse à 49m,50.	Vitesse à 50m,50.	Vitesse à 50m.	Moyenne des vitesses à 50 mètres.	Différence avec la vitesse moyenne à 50 mètres.		Différence moyenne quadratique.	1er appareil crusher.			2me appareil crusher.			OBSERVATIONS.
	Simple.	Moyenne.					Simple.	Carrée.		Raccourcissement.	Pression.	Moyenne des pressions.	Raccourcissement.	Pression.	Moyenne des pressions.	
	m/m	m/m	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m/m	atm.	atm.	m/m	atm.	atm.	
1	470,0		441,8	441,6	441,7		»	»		1,78	»		1,75			premier coup écarté.
2	467,8		440,6	441,6	441,1		1,3	1,69		1,77	1894		1,81	1921,5		
3	468,6		444,0	444,4	444,2		1,8	3,24		1,90	1980		1,80	1915		
4	470,0		442,9	442,9	442,9		0,5	0,25		1,84	1941		1,84	1941		
5	468,0		440,2	»	»		»	»		1,82	»		1,80	»		5me coup, non observé.
6	470,4		442,1	443,1	442,6		0,2	0,04		1,85	1947,5		1,84	1941		
7	468,2		442,9	443,1	443,0		0,6	0,36		1,84	1941		1,82	1928		
8	470,4	469,5	443,9	443,7	443,8	442,4	1,4	1,96	1,00	1,78	1901	1918,5	1,78	1901	1913	
9	469,7		443,2	442,8	443,0		0,6	0,36		1,77	1894		1,76	1887		
10	469,4		441,4	440,2	440,8		1,6	2,56		1,76	1887		1,77	1894		
11	470,5		441,4	441,4	441,4		1,0	1,00		1,76	1887		1,76	1887		
12	469,9		440,7	437,5	»		»	»		1,78	»		1,80	»		12me coup, erreur d'observation.
13	470,5		441,9	442,1	442,0		0,4	0,16		1,76	1887		1,76	1887		
14	469,7		443,2	442,6	442,9		0,5	0,25		1,84	1941		1,84	1941		
15	468,4		443,7	442,9	443,3		0,9	0,81		1,88	1967		1,88	1967		
16	470,0		441,8	441,4	441,6		0,8	0,64		1,78	1901		1,75	1880		
17	469,5		441,9	440,9	441,4		1,0	1,00		1,78	1901		1,77	1908		
18	469,5		442,0	441,2	441,6		0,8	0,64		1,79	1908		1,79	1894		

Conditions de chargement :

Canon de 8c,7.

Distance normale de la tranche de culasse au culot de l'obus	= 467,6 mm.
Densité normale de chargement,	= 0,847 k — d³.
Poids du projectile,	= 6,800 k.
Poids de la charge,	= 1,500 k.

Conditions atmosphériques :

Temps : calme.
Vent : vitesse = 5 mètres. Direction : 315°.
Baromètre : 764mm5 ; réduit à 0° : 763mm9.
Psychromètre = 1°,1.
Densité de l'air = 1,057.

Résultats moyens et extrêmes.

Nombre de coups utilisés pour le calcul des moyennes.		10.
Densité moyenne de chargement (Δ).		0,8413 k—d³.
Vitesse moyenne à 50 mètres.		442,4 m.
Écart quadratique par rapport à la vitesse moyenne à 50 mètres.		1,00 m.
Vitesse initiale moyenne.		459,5 m.
Vitesse initiale moyenne corrigée de (Δ).		460,3 m.
Moyenne des pressions à la culasse	1er appareil Crusher.	1918,5 atm.
	2me appareil Crusher.	1913 atm.
Pression à la culasse, la plus élevée	1er appareil Crusher.	1980 atm.
	2me appareil Crusher	1967 atm.

Conclusions :

1° On constate, en tirant plusieurs projectiles, dans les mêmes conditions apparentes, des différences dans les vitesses et aussi dans les pressions mesurées à chaque coup.

Ainsi, on trouve un excès de

$$444,2 - 442,4 = 1,8\ m - s,$$

entre la plus grande et la moyenne des vitesses ; et un excès de

$$1980 - 1918,5 = 65,5 \text{ atm.},$$

entre la plus grande et la moyenne des pressions (1er Crusher).

2° On se rendra compte de la régularité d'une poudre, en comparant les valeurs de ε et de $P_s - P_o$, à celles obtenues en tirant une poudre type.

En procédant ainsi, on observe que les poudres sans fumée sont, actuellement, plus irrégulières que la poudre noire.

196. Détermination des caractéristiques des poudres, par le tir. — Nous avons vu que les caractéristiques des explosifs pouvaient s'obtenir par des expériences faites à l'aide d'un appareil enregistreur *(n° 63)* ; on sait aussi les déterminer en s'appuyant sur les résultats des épreuves balistiques.

Pour le prouver, nous partons de l'expression suivante (*n° 125*).

$$\frac{1}{2} m v_o^2 = \frac{1-\rho}{n-1} fQ \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + X}\right)^{n-1} - A \left[\frac{2M(1) - 1}{2}\right] \right\},$$

que nous mettons sous la forme :

$$\frac{1}{2} m v_o^2 = \frac{1-\rho}{n-1} f \left\{ Q \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + X}\right)^{n-1}\right] - AQ\,[M(1) - 0,5000] \right\},$$

et pour simplifier les écritures nous posons ensuite :

$$Q \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + X}\right)^{n-1}\right] = G$$

et

$$AQ\,[M(1) - 0,5000] = H.$$

Supposons maintenant qu'on tire successivement deux charges de poids Q_1 et Q_2, et désignons respectivement :

par v_1 et v_2 les vitesses initiales du projectile,

par G_1 et G_2 les valeurs du facteur G pour ces charges.

Cela étant, nous calculons d'abord la quantité H, par l'équation (*) :

$$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 = \frac{G_1 - H}{G_2 - H}, \tag{90}$$

et ensuite nous déterminons f par la formule :

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{1-\rho}{n-1} \cdot f(G_1 - H). \tag{91}$$

Connaissant H et f, la valeur de φ se déduira de l'expression :

$$A = \frac{H}{Q_1\,[M(1) - 0{,}5000]} = \frac{g\,(n-1)\,(1-\rho)\,S^2 Z^2 f}{a \,.\, Q_1 \,.\, \varphi^2}. \tag{92}$$

197. Application. — Supposons qu'il faille calculer les caractéristiques f et φ de la poudre sans fumée (L³ de Wetteren), tirée dans le canon de campagne de 8c7, en se donnant les éléments suivants :

le poids du projectile,	$a = 6{,}804\ k$;
la section réduite de l'âme,	$S = 0{,}6196\ d^2$;
le volume de la chambre à poudre,	$V_0 = 1{,}773\ d^3$;
le chemin parcouru par le projectile,	$X = 16{,}35\ d$;
le coefficient tenant compte des résistances,	$\rho = 0{,}007$;
la forme et les dimensions du grain : lamelle de $0^{mm}7$ d'épaisseur ayant pour base un carré de 5^{mm} de côté ;	
la vitesse correspondant à la charge $Q_1 = 0{,}650\ k$:	$v_1 = 525\ m$;
la vitesse correspondant à la charge $Q_2 = 0{,}540\ k$:	$v_2 = 458\ m$;
le covolume de la poudre,	$\eta = 0{,}676\ d^3$?

(*) Nous rappelons que la quantité A varie en raison inverse du poids de la charge.

En adoptant pour unités fondamentales le kilogramme, le décimètre et la seconde, nous trouvons :

(*charge de 0,650 k*)

$$\lambda_1 = \frac{V_0 - \eta Q_1}{S} = \frac{1,773 - 0,676 \,.\, 0,650}{0,6196} = 2,15 \ (d).$$

(*charge de 0,540 k*)

$$\lambda_2 = \frac{V_0 - \eta Q_2}{S} = \frac{1,773 - 0,676 \,.\, 0,540}{0,6196} = 2,27 \ (d).$$

$$G_1 = Q_1 \left[1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + X}\right)^{0,11}\right] = 0,13732 \ (k).$$

$$G_2 = Q_2 \left[1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + X}\right)^{0,11}\right] = 0,11186 \ (k).$$

La relation (90) nous donne alors :

$$1,313 = \frac{0,13732 - H}{0,11186 - H},$$

d'où nous tirons :

$$H = 0,03051.$$

Nous pouvons maintenant calculer f par la formule (91), ce qui conduit à :

$$\frac{6.804 \,.\, (5250)^2}{2 \,.\, 98,1} = \frac{0,9930}{0,11} (0,13732 - 0,03051) \, f;$$

et en effectuant les opérations par logarithmes, nous obtenons :

$$f = 900133 \ (k\text{-}d^2).$$

Enfin, la valeur de φ se déduit de l'expression (92), qui devient :

$$\frac{0,03051}{0,650\,(0,9967 - 0,5000)}$$

$$= \frac{98,1 \,.\, 0,11 \,.\, 0,9930 \,.\, \overline{0,6196}^2 \,.\, \overline{0,0035}^2 \,.\, 990133}{6,804 \,.\, 0,650 \,.\, \varphi^2},$$

et en opérant par logarithmes, nous avons :

$$\varphi = 10,92 \; d.\; s.$$

CHAPITRE VI.

APPAREILS BALISTIQUES.

---

§ 1.

Mesure de la vitesse d'un projectile.

198. Il existe un grand nombre d'appareils balistiques, pour mesurer la vitesse d'un projectile, la vitesse du recul d'une arme à feu et la pression des gaz dans l'âme, mais nous ne donnerons dans ce cours que le principe et le mode d'emploi des appareils dont nous avons parlé antérieurement.

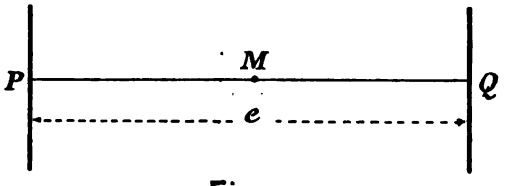
Nous commencerons cette étude, en exposant la marche à suivre pour obtenir la vitesse d'un projectile en un point de sa trajectoire dans l'air.

199. Principe de l'appareil servant à la mesure de la vitesse d'un projectile. — Pour déterminer la vitesse d'un projectile en un point de sa trajectoire dans l'air, on se sert, en Belgique, du chronographe Leboulengé.

Cet instrument mesure directement le temps que met le projectile pour franchir la distance horizontale e de deux cadres-cibles P et Q

(fig. 29), et l'on déduit alors la vitesse v du projectile au point M, milieu de l'intervalle considéré, en admettant la relation :

$$v = \frac{e}{t}.$$



(Fig. 29)

L'appareil se compose d'une colonne fixée perpendiculairement à un support en bois S (fig. 30). (*)

Sur la colonne on dispose, à des hauteurs déterminées, deux électro-aimants A et B activés par des courants électriques.

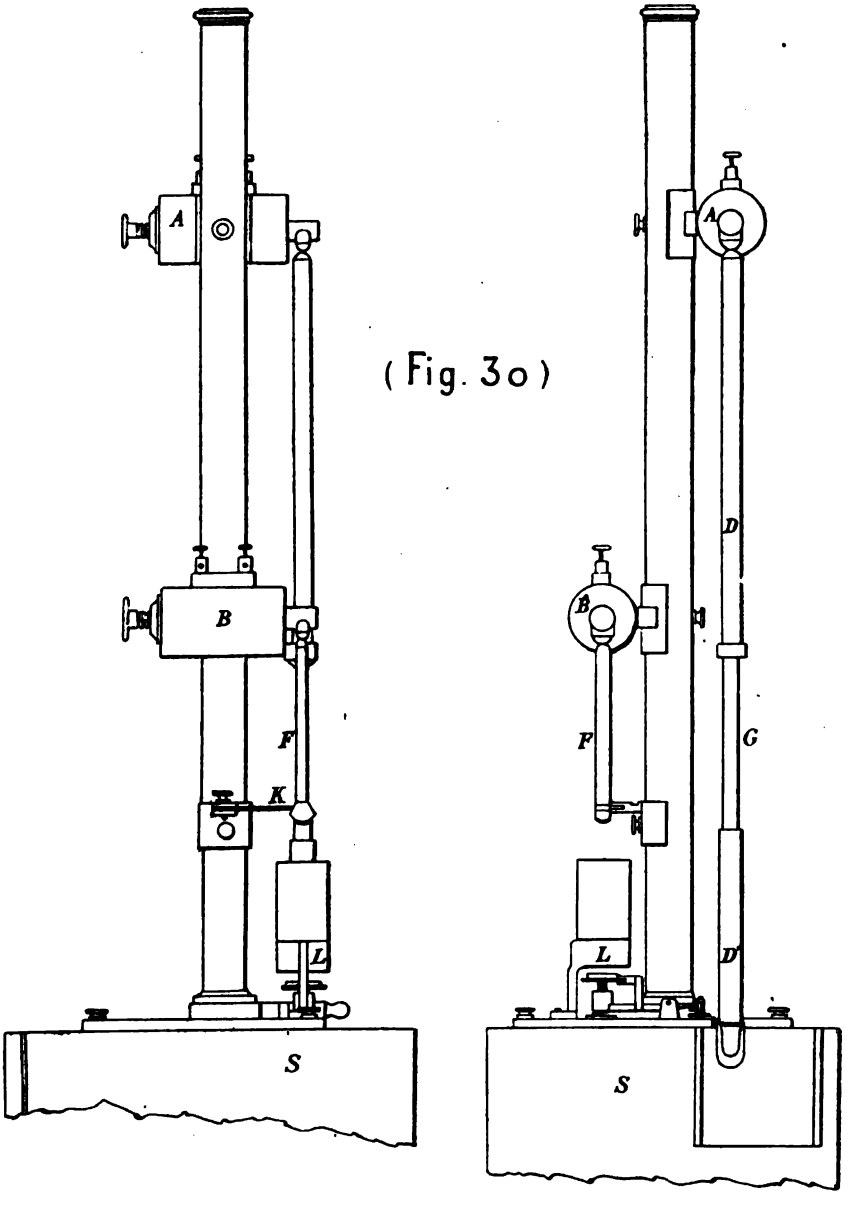
A l'électro-aimant A est suspendu, par attraction magnétique, un *chronomètre* G. Il porte deux gaînes en zinc D et D', nommées *cartouches-récepteurs*. Comme nous le verrons plus loin, la chute du chronomètre se produit lorsque le projectile traverse le plan P. (fig. 29).

A l'électro-aimant B est suspendu un *enregistreur* F, qui tombe au moment où le projectile perce le plan Q, et dont la chute détermine le fonctionnement d'une détente.

(*) De nombreux appareils balistiques ont été construits, dans ces dernières années, pour approfondir les lois des phénomènes complexes que présente la combustion de la poudre, tant en vase clos que dans les armes à feu, et aussi, pour déterminer les effets produits par le tir sur les bouches à feu et sur les affûts.

Presque tous ces appareils se rattachent à une même préoccupation : introduire la notion du temps dans des phénomènes si brusques et si violents, qu'on se trouvait réduit à les considérer comme instantanés.

Le général Sebert de la marine française, le colonel Mata de l'artillerie espagnole, M. Marcel Deprez et d'autres ont imaginé des appareils très perfectionnés, réalisant cette conception.

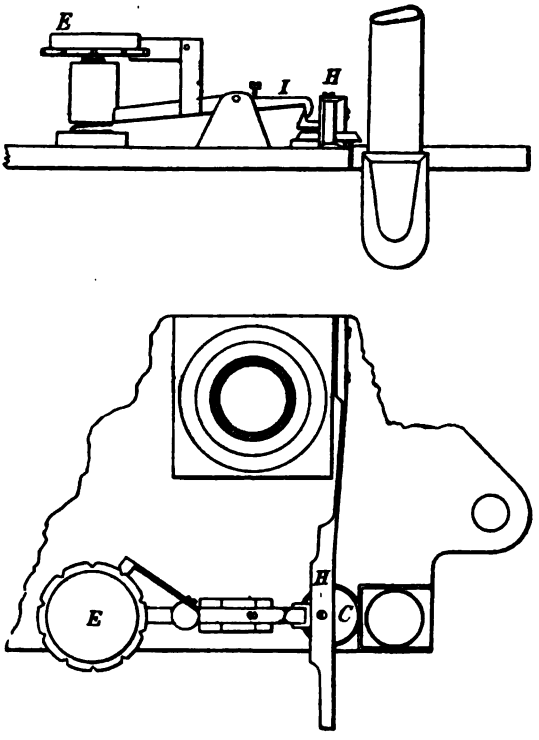


(Fig. 30)

A. Electro-aimant du chronomètre.
B. Electro-aimant de l'enregistreur.
G. Chronomètre.
D. Cartouche-récepteur supérieur.
D'. Cartouche-récepteur inférieur.
F. Enregistreur.
L. Tube-guide.
K. Appui de l'enregistreur.
S. Support en bois.

La détente (fig. 31) est disposée sur la face supérieure du support *S*. Elle se compose d'un plateau *E*, d'un levier *I* terminé par une griffe, et d'un couteau *C* commandé par un ressort *H*.

Lorsque l'enregistreur tombe sur le plateau, le levier bascule, le couteau se dégage, il heurte le chronomètre et marque un trait sur l'un des cartouches-récepteurs.

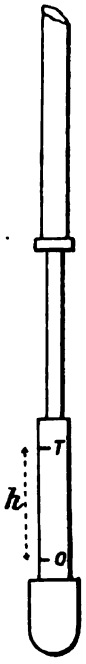


(Fig. 31)

E. Plateau sur lequel tombe l'enregistreur.
C. Couteau de la détente. (*)
H. Ressort agissant sur le couteau.
I. Levier à griffe maintenant le ressort *H*.

(*) Dans le chronographe Leboulengé, perfectionné par M. Bréger, le couteau est carré, en sorte que les oscillations que le chronomètre peut prendre, d'avant en arrière, ne modifient pas l'espace que le couteau a à parcourir pour frapper la cartouche.

Le trait *O* (fig. 32) est obtenu en agissant sur la détente, le chronomètre étant suspendu à l'électro-aimant ; le trait *T* est marqué pendant le mouvement du chronomètre ; la hauteur de chute est *h*.



(Fig.32)

Voyons maintenant comment on organise les *cadres-cibles* ou *interrupteurs*.

Lorsqu'il s'agit du tir d'une bouche à feu chaque interrupteur est formé d'un cadre en bois (fig. 33), dont les montants sont garnis de bornes jumelées permettant de pincer des fils de cuivre. Ces fils sont tendus horizontalement et séparés par des intervalles moindres que le demi-calibre du projectile.

Le premier cadre-cible se place généralement à 25 mètres et le second à 75 mètres de la pièce.

Le plus grand soin doit être apporté dans l'installation (*).

(*) Parmi les causes d'erreurs qui influent sur la mesure de la vitesse des projectiles, il en est qui tiennent au mode d'emploi du chronographe et ne sauraient lui être imputées ; ce sont celles qui résultent de la mesure de l'écartement des cadres, de leur défaut de verticalité, de l'inégale tension des fils conducteurs.

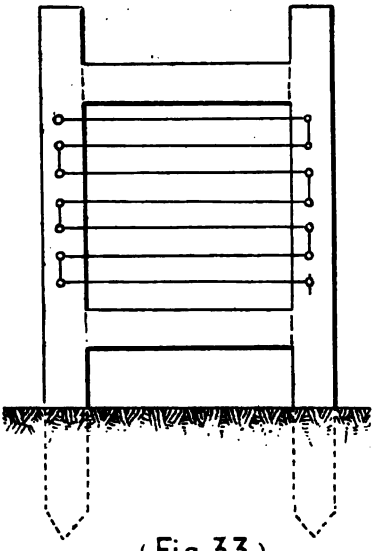
Il y a aussi des causes d'erreurs inhérentes à l'instrument, parmi lesquelles nous citons :

Les variations de la pile qui modifient les retards de désaimantation, depuis le moment où est prise la dernière disjonction jusqu'à celui où les courants sont rompus par le projectile.

Les variations du fonctionnement du disjoncteur.

Les erreurs de lecture.

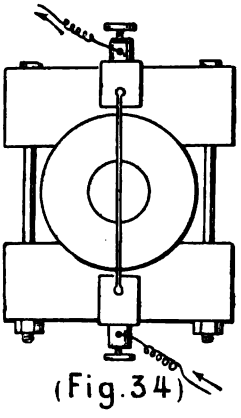
Ces causes d'erreurs doivent être considérées comme accidentelles, et dès lors, la répétition des mesures permet de déterminer l'erreur probable de l'appareil envisagé.



(Fig. 33)

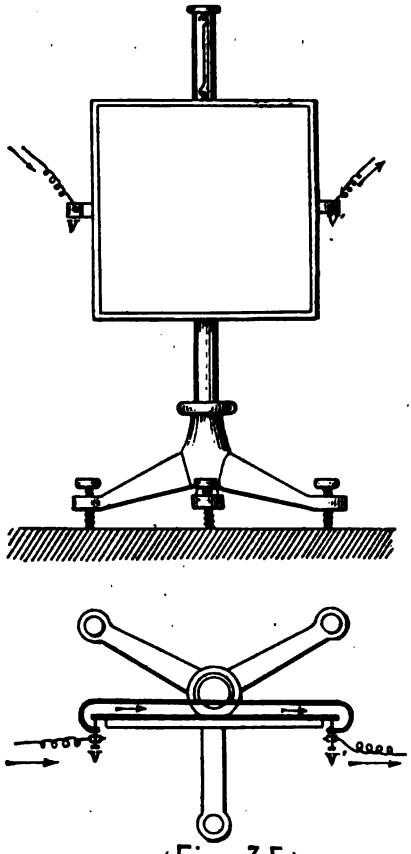
Quand il faut mesurer la vitesse du projectile d'une arme à feu portative, on se sert d'un dispositif spécial pour produire la rupture des courants des électro-aimants *A* et *B*.

Le premier interrupteur est formé par un simple fil de cuivre tendu à la bouche du canon (fig. 34).



(Fig. 34)

Le second interrupteur est constitué, généralement, par une plaque en fonte suspendue à un crochet isolateur (fig. 35).



(Fig. 35)

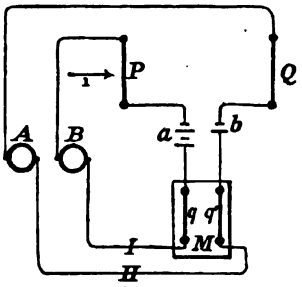
Cette plaque est en contact avec deux vis V et V' auxquelles sont attachés les fils du circuit. Par le choc de la balle, la plaque s'écarte un instant de ses appuis, ce qui amène la rupture du circuit aux points V et V'. (*)

(*) On a modifié, dans ces derniers temps, le mode d'attache, pour éviter que, par suite du choc de la balle, la cible n'éprouve un mouvement de rotation autour d'un axe vertical, auquel cas la rupture des courants n'est plus simultanée.

On a eu recours à un mode de suspension tel que la rotation de la cible ne puisse se faire qu'autour d'un axe horizontal.

On emploie, en France, une plaque *cible disjonctive* très perfectionnée.

200. Emploi de l'appareil. — Pour faire une mesure, on établit les connexions comme nous l'indiquons schématiquement sur la fig. 36.



(Fig. 36)

A électro-aimant du chronomètre.
B électro-aimant de l'enregistreur.
I circuit de l'électro-aimant *A*.
II circuit de l'électro-aimant *B*.
P premier cadre-cible.
Q second cadre-cible.
a et *b* piles.
q et *q'* lamettes du disjoncteur *M*.
La flèche *1* indique la direction du mouvement du projectile.

Les circuits *I* et *II*, dans lesquels sont placés les électro-aimants *A* et *B*, passent par les lamettes métalliques *q* et *q'* d'un dispositif *M*, nommé *disjoncteur*. Par le jeu de ce disjoncteur on peut rompre simultanément les deux courants.

En résumé, la chute du chronomètre amène la rupture du premier circuit, et celle de l'enregistreur provoque le fonctionnement de la détente et l'ouverture du second circuit. C'est de la hauteur de chute *h*, comptée à partir du trait origine, qu'il faut déduire la vitesse du projectile, en consultant une table et en procédant comme nous allons l'indiquer.

201. La mesure d'une durée est toujours sujette à une erreur, provenant des retards dans le fonctionnement des organes électriques et des organes mécaniques de l'appareil ; l'ensemble de ces retards se nomme *durée de disjonction*.

Pour corriger cette erreur, on procède comme suit :

Désignons par t_1 l'heure à laquelle se rompt le premier circuit ; le chronomètre tombera à l'heure $t_1 + \theta_1$, θ_1 étant la durée de la désaimantation de l'électro-aimant A.

Représentons par t_2 l'heure à laquelle le projectile coupe le second circuit ; le trait se marquera sur le chronomètre à l'heure $t_2 + \theta_2 + \theta_3$, θ_2 désignant la durée de désaimantation de l'électro-aimant B et θ_3 la durée du fonctionnement de la détente.

Or, le temps t que met le projectile pour franchir l'intervalle des interrupteurs est donné par la relation :

$$t = t_2 - t_1,$$

tandis que le temps t_a, mesuré par l'appareil, est exprimé par la formule :

$$t_a = t_2 + \theta_2 + \theta_3 - (t_1 + \theta_1) ;$$

ce qui nous permet d'écrire :

$$t_a = t + (\theta_2 + \theta_3 - \theta_1),$$

et en représentant la durée de disjonction $\theta_2 + \theta_3 - \theta_1$ par t_d, nous obtenons :

$$t_a = t + t_d.$$

Ainsi, pour mesurer la durée t du phénomène, il faut déterminer préalablement la durée de disjonction t_d.

Lorsque $t = 0$, on trouve :

$$t'_a = t_d.$$

En conséquence, on obtiendra le temps de disjonction t_d, en coupant simultanément les deux circuits à l'aide du disjoncteur.

Soient : h' la hauteur de chute du chronomètre correspondant au temps t_d ;
h la hauteur relative au temps t_a ;
g l'accélération de la pesanteur.

En vertu de la loi de la chute des corps dans le vide, on aura :

$$t_d = \sqrt{\frac{2h'}{g}}$$

et

$$t_a = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

En conséquence, la vitesse du projectile se calculera par la formule :

$$v = \frac{e}{t_a - t_d}$$

ou

$$v = \frac{e}{\sqrt{\frac{2h}{g}} - \sqrt{\frac{2h'}{g}}} \qquad (93)$$

202. Pour opérer facilement, on a établi une table donnant immédiatement la valeur de $\sqrt{\frac{2h}{g}}$, qui correspond à une hauteur de chute connue.

On peut arriver encore à une plus grande rapidité d'exécution à l'aide d'une règle en métal, graduée de manière à donner la vitesse par une simple lecture. Pour obtenir la graduation, on a remplacé dans la formule (93), les quantités e et h' par des valeurs choisies, et l'on a inscrit sur la règle les valeurs de v corrélatives à celles de h.

203. Remarque. — La vitesse initiale d'un projectile se déduit d'un calcul et d'une mesure de vitesse faite à une faible distance de l'arme à feu, généralement 50 mètres.

§ 2.

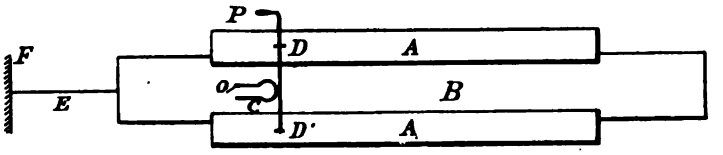
Mesure de la vitesse du recul d'une arme à feu.

204. La détermination de la vitesse qui correspond à un parcours donné d'une masse reculante, peut se faire à l'aide d'un appareil, nommé *vélocimètre*.

Indépendamment de l'intérêt présenté par cet appareil pour l'étude du recul, il donne des indications précieuses sur le fonctionnement des freins, et sur les effets des poudres dans les armes à feu.

205. Principe du vélocimètre. — Le vélocimètre est fondé sur le principe suivant :

Un ruban d'acier *B*, dont la face supérieure est couverte de noir de fumée, est disposé horizontalement de façon que son axe soit parallèle au plan de tir de l'arme à feu (fig. 37).



(Fig. 37)

A glissière.
B ruban d'acier.
C diapason.
DD' axe autour duquel peut tourner le diapason.
P poignée commandant l'axe *DD'*.
E liaison indéformable.
F point d'attache avec la masse reculante.
O plume du diapason.

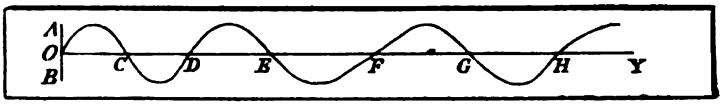
Ce ruban est guidé par des glissières fixes *A* et son extrémité postérieure est en relation avec la masse reculante, par l'intermédiaire d'une liaison indéformable *E* ; le ruban subit donc les mêmes déplacements que la masse mobile.

Un diapason C est disposé au-dessus du ruban, et l'une de ses branches porte une plume O, qu'on peut amener en contact avec le noir de fumée.

Le diapason étant au repos, la plume trace une ligne droite OY sur le ruban d'acier, déplacé à la main (fig. 38).

Le diapason étant en mouvement, elle trace un petit trait transversal AB sur le ruban laissé au repos.

Enfin, le diapason étant en mouvement, elle trace une courbe ondulée sur le ruban entraîné par la masse reculante.



(Fig. 38)

Soient : O, C, D, E... etc., les intersections de la courbe, tracée par la plume sur le noir de fumée, avec la ligne moyenne OY.

On voit que les longueurs OC, CD, DE... sont parcourues par le ruban, pendant la durée d'une demi-vibration du diapason.

Comme la durée de chaque vibration est une quantité constante $\left(\frac{1}{1068}\right.$ de seconde dans l'appareil Sebert$\left.\right)$, il suffit de mesurer, à l'aide d'un instrument micrométrique, les différentes longueurs OC, OD, OE,... etc., pour avoir les espaces parcourus pendant les temps Δt, $2\Delta t$, $3\Delta t$,...

On obtiendra alors, très approximativement, la vitesse qui correspond au déplacement y et au temps t, en formant le rapport $\frac{\Delta y}{\Delta t}$, Δy étant le chemin parcouru par la masse reculante pendant le temps Δt, postérieur à l'heure t.

Supposons qu'on veuille déduire des expériences faites avec le vélocimètre, la vitesse v du projectile après un parcours donné x dans le canon.

On prend dans ce cas les dispositions nécessaires *(n° 144)*, pour que la résistance au déplacement de la masse reculante soit négligeable, et l'on utilise les relations obtenues dans l'étude du recul libre.

On obtient de cette manière :

$$x = \frac{M}{m + \theta m'} y,$$

et

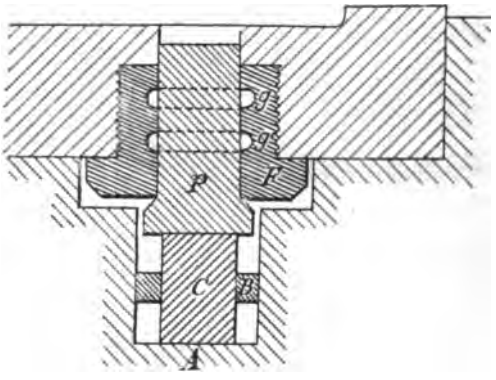
$$v = \frac{M}{m + \theta m'} \frac{\Delta y}{\Delta t}.$$

§ 3.

Mesure de la pression des gaz.

207. Principe du crusher ordinaire. — La pression maximum des gaz se mesure, généralement, à l'aide d'un manomètre à écrasement, appelé *crusher*.

Le crusher pour bouche à feu est logé dans l'appareil de fermeture. Il se compose essentiellement d'un piston P en acier, d'un cylindre C en cuivre rouge, d'une bague B en caoutchouc destinée à centrer le cylindre C, enfin d'un bouchon F (fig. 39).



(Fig. 39)

P, piston.

C, cylindre en cuivre rouge.

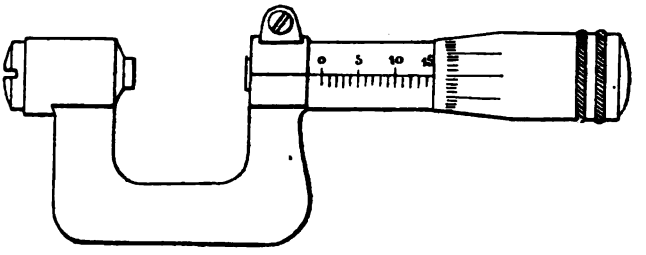
F, bouchon fileté avec gorges g et g', destinées à loger un corps lubrifiant.

B, bague en caoutchouc.

A, appareil de fermeture, préparé de manière à recevoir le crusher ; il sert d'enclume.

Sous l'action des gaz, le piston P écrase le cylindre C contre

l'enclume A, et fait subir à ce cylindre un certain raccourcissement, mesuré avec un compas micrométrique (fig. 40).

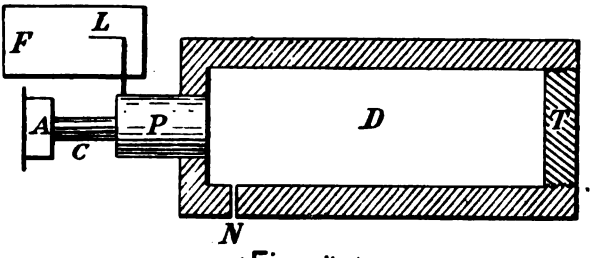


(Fig. 40)

On consulte alors une *table de tarage ;* elle donne en atmosphères les pressions qui correspondent à des écrasements variant de dixième en dixième de millimètre.

Cette table a été établie, une fois pour toutes, en soumettant à des efforts connus, des cylindres identiques à celui de l'appareil crusher, et en mesurant les raccourcissements de ces cylindres. (*)

208. Principe du crusher enregistreur. — En France, la commission de réception des poudres emploie un *crusher enregistreur ;* cet appareil fait connaître la loi de variation des pressions en fonction du temps.



(Fig. 41)

Il se compose, essentiellement, d'un piston P en acier, d'un cylindre C en cuivre rouge et d'une enclume A. Le piston porte, parallèlement

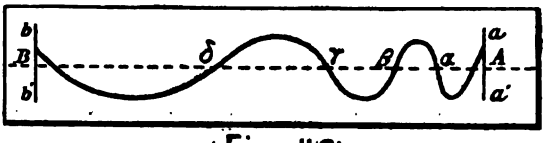
(*) Voir la note VII.

à l'axe du cylindre C, une lame vibrante L armée d'une pointe, que l'on met en contact avec une petite plaque d'acier poli F, recouverte de noir de fumée. (*)

La charge est disposée dans la chambre D, obturée par un tampon T; le dispositif d'inflammation est logé dans une lumière N (fig. 41).

La lame L fait, en général, 5000 vibrations synchrones par seconde, de sorte que chacune d'elles correspond à $\frac{1}{5000}$ de seconde.

Lorsque le piston P de l'appareil est au repos, et que la lame vibre, la pointe marque un trait aa', en oscillant de part et d'autre de la ligne moyenne AB. Quand le piston se déplace sous l'action des gaz, la pointe trace une ligne sinusoïdale. Enfin, lorsque le piston s'arrête la pointe fait un trait bb' (fig. 42).



(Fig. 42)

Croquis agrandi de la plaque F.

$A\alpha$, $A\beta$, $A\gamma$ etc., sont les raccourcissements du cylindre C après les temps Δt, $2\,\Delta t$, $3\,\Delta t$ etc., et une table de tarage fait connaitre les pressions qui correspondent aux écrasements.

Avec ces renseignements on pourra déterminer autant de points qu'on voudra du diagramme des pressions en fonction du temps. A cet effet, on portera sur un axe horizontal des longueurs proportionnelles aux durées Δt, $2\,\Delta t$, $3\,\Delta t$ etc., et sur l'axe perpendiculaire au premier, des longueurs proportionnelles aux pressions, lues dans la table de tarage, en regard des raccourcissements $A\alpha$, $A\beta$, $A\gamma$ etc.

(*) Au lieu d'une plaque, on emploie parfois un cylindre animé d'un mouvement de rotation.

209. Table des fonctions de u, pour la poudre à grains irréguliers, à grains sphériques ou à grains cubiques.

u	$F(u)$	$M(u)$	A	B	OBSERVATIONS.
1,00	1,0000	0,6052	0,0000	1,0000	Les deux dernières colonnes servent au calcul du maximum de pression.
0,95	0,9999	0,5559	0,0008	0,9916	
0,90	0,9990	0,5093	0,0033	0,9825	
0,85	0,9966	0,4659	0,0078	0,9570	
0,80	0,9920	0,4249	0,0147	0,9315	
0,75	0,9844	0,3858	0,0245	0,8925	
0,70	0,9730	0,3488	0,0376	0,8525	
0,65	0,9571	0,3130	0,0549	0,8025	
0,60	0,9361	0,2795	0,0773	0,7508	
0,55	0,9089	0,2490	0,1060	0,6975	
0.50	0,8750	0,2200	0,1439	0,6468	
0,45	0,8336	0,1921	0,1910	0,5785	
0,40	0,7840	0,1652	0,2535	0,5090	
0,35	0,7354	0,1411	0,3371	0,4455	
0,30	0,6570	0,1170	0,4520	0,3797	
0,25	0,5777	0,0950	0,6159	0,3155	
0,20	0,4880	0,0740	0,8649	0,2503	
0,15	0,3859	0,0535			
0,10	0,2710	0,0346			
0,05	0,1426	0,0173			
0,00	0,0000	0,0000			

210. Table des fonctions de u, pour la poudre à grains prismatiques avec canaux.

u	$F(u)$	$M(u)$	A	B	OBSERVATIONS.
1,00	1,0000	0,8184	0,0476	0,6757	Diamètre du cercle inscrit dans l'hexagone régulier, $2R = 36^{mm}6$.
0,95	0,9737	0,7690	0,0540	0,6343	
0,90	0,9450	0,7125	0,0630	0,5944	Diamètre du canal central, $2r = 9^{mm}6$.
0,85	0,9137	0,6656	0,0725	0,5560	Hauteur du grain, $h = 25^{mm}$.
0,80	0,8800	0,6196	0,0820	0,5193	
0,75	0,8437	0,5748	0,0940	0,4811	Moitié de la plus petite dimension du grain, $Z = 0^{d},0625$.
0,70	0,8050	0,5308	0,1075	0,4465	
0,65	0,7637	0,4879	0,1220	0,4120	
0,60	0,7200	0,4457	0,1390	0,3774	
0,55	0,6737	0,4047	0,1605	0,3428	
0,50	0,6250	0,3642	0,1850	0,3091	
0,45	0,5737	0,3249	0,2150	0,2762	
0,40	0,5200	0,2859	0,2535	0,2438	
0,35	0,4637	0,2480	0,3010	0,2119	
0,30	0,4050	0,2105	0,3660	0,1804	
0,25	0,3437	0,1741	0,4745	0,1494	
0,20	0,2800	0,1378	0,5910	0,1188	
0,15	0,2137	0,1026	0,8172	0,0900	
0,10	0,1450	0,0677			
0,05	0,0737	0,0338			
0,00	0,0000	0,0000			

211. Table donnant les valeurs de $1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$.

$1+\frac{x}{\lambda}$	$1-\frac{1}{\left(1+\frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$	$1+\frac{x}{\lambda}$	$1-\frac{1}{\left(1+\frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$	$1+\frac{x}{\lambda}$	$1-\frac{1}{\left(1+\frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$	$1+\frac{x}{\lambda}$	$1-\frac{1}{\left(1+\frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$
1,1	0,01043	4,3	0,14824	7,5	0,19880	10,7	0,22951
1,2	0,01986	4,4	0,15039	7,6	0,19996	10,8	0,23050
1,3	0,02845	4,5	0,15249	7,7	0,20111	10,9	0,23108
1,4	0,03634	4,6	0,15453	7,8	0,20225	11,0	0,23185
1,5	0,04362	4,7	0,15653	7,9	0,20336	11,1	0,23261
1,6	0,05039	4,8	0,15848	8,0	0,20446	11,2	0,23337
1,7	0,05670	4,9	0,16039	8,1	0,20555	11,3	0,23412
1,8	0,06261	5,0	0,16225	8,2	0,20662	11,4	0,23486
1,9	0,06817	5,1	0,16408	8,3	0,20768	11,5	0,23560
2,0	0,07341	5,2	0,16586	8,4	0,20872	11,6	0,23632
2,1	0,07837	5,3	0,16760	8,5	0,20975	11,7	0,23704
2,2	0,08308	5,4	0,16931	8,6	0,21077	11,8	0,23776
2,3	0,08755	5,5	0,17099	8,7	0,21177	11,9	0,23847
2,4	0,09181	5,6	0,17263	8,8	0,21276	12,0	0,23917
2,5	0,09588	5,7	0,17424	8,9	0,21374	12,1	0,23986
2,6	0,09977	5,8	0,17582	9,0	0,21470	12,2	0,24055
2,7	0,10350	5,9	0,17737	9,1	0,21566	12,3	0,24123
2,8	0,10708	6,0	0,17889	9,2	0,21660	12,4	0,24191
2,9	0,11052	6,1	0,18038	9,3	0,21753	12,5	0,24257
3,0	0,11383	6,2	0,18184	9,4	0,21845	12,6	0,24324
3,1	0,11702	6,3	0,18328	9,5	0,21936	12,7	0,24390
3,2	0,12010	6,4	0,18469	9,6	0,22026	12,8	0,24455
3,3	0,12307	6,5	0,18608	9,7	0,22115	12,9	0,24519
3,4	0,12595	6,6	0,18745	9,8	0,22203	13,0	0,24584
3,5	0,12873	6,7	0,18879	9,9	0,22289	13,1	0,24647
3,6	0,13143	6,8	0,19011	10,0	0,22375	13,2	0,24710
3,7	0,13404	6,9	0,19141	10,1	0,22460	13,3	0,24773
3,8	0,13658	7,0	0,19269	10,2	0,22544	13,4	0,24835
3,9	0,13904	7,1	0,19395	10,3	0,22627	13,5	0,24896
4,0	0,14143	7,2	0,19519	10,4	0,22709	13,6	0,24957
4,1	0,14376	7,3	0,19641	10,5	0,22791	13,7	0,25017
4,2	0,14603	7,4	0,19761	10,6	0,22871	13,8	0,25077

Table donnant les valeurs de $1 - \frac{1}{\left(1+\frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$.

$1+\frac{x}{\lambda}$	$1-\frac{1}{\left(1+\frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$	$1+\frac{x}{\lambda}$	$1-\frac{1}{\left(1+\frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$	$1+\frac{x}{\lambda}$	$1-\frac{1}{\left(1+\frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$	$1+\frac{x}{\lambda}$	$1-\frac{1}{\left(1+\frac{x}{\lambda}\right)^{0,11}}$
13,9	0,25137	17,0	0,26776	20,1	0,28118	23,2	0,29238
14,0	0,25196	17,1	0,26824	20,2	0,28158	23,3	0,29271
14,1	0,25254	17,2	0,26871	20,3	0,28198	23,4	0,29304
14,2	0,25313	17,3	0,26917	20,4	0,28238	23,5	0,29336
14,3	0,25370	17,4	0,26964	20,5	0,28277	23,6	0,29369
14,4	0,25427	17,5	0,27010	20,6	0,28316	23,7	0,29402
14,5	0,25484	17,6	0,27055	20,7	0,28356	23,8	0,29435
14,6	0,25540	17,7	0,27101	20,8	0,28393	23,9	0,29468
14,7	0,25596	17,8	0,27146	20,9	0,28431	24,0	0,29501
14,8	0,25652	17,9	0,27191	21,0	0,28469	24,1	0,29534
14,9	0,25707	18,0	0,27235	21,1	0,28506	24,2	0,29567
15,0	0,25761	18,1	0,27279	21,2	0,28542	24,3	0,29600
15,1	0,25816	18,2	0,27324	21,3	0,28577	24,4	0,29632
15,2	0,25869	18,3	0,27368	21,4	0,28613	24,5	0,29664
15,3	0,25923	18,4	0,27411	21,5	0,28647	24,6	0,29696
15,4	0,25976	18,5	0,27454	21,6	0,28683	24,7	0,29728
15,5	0,26029	18,6	0,27497	21,7	0,28719	24,8	0,29760
15,6	0,26081	18,7	0,27540	21,8	0,28754	24,9	0,29792
15,7	0,26133	18,8	0,27583	21,9	0,28790	25,0	0,29824
15,8	0,26184	18,9	0,27625	22,0	0,28825	25,1	0,29854
15,9	0,26236	19,0	0,27667	22,1	0,28861	25,2	0,29884
16,0	0,26287	19,1	0,27709	22,2	0,28897	25,3	0,29914
16,1	0,26337	19,2	0,27750	22,3	0,28932	25,4	0,29943
16,2	0,26387	19,3	0,27791	22,4	0,28967	25,5	0,29972
16,3	0,26437	19,4	0,27832	22,5	0,29002	25,6	0,30001
16,4	0,26486	19,5	0,27873	22,6	0,29036	25,7	0,30030
16,5	0,26536	19,6	0,27914	22,7	0,29070	25,8	0,30059
16,6	0,26584	19,7	0,27955	22,8	0,29104	25,9	0,30088
16,7	0,26633	19,8	0,27996	22,9	0,29138	26,0	0,30118
16,8	0,26681	19,9	0,28037	23,0	0,29172		
16,9	0,26729	20,0	0,28078	23,1	0,29205		

ANNEXE.

Comme nous ne disposons que d'un petit nombre de leçons pour exposer les théories de la balistique intérieure, science très vaste si l'on envisage toutes les recherches qui s'y rapportent, nous n'avons fait qu'effleurer, dans ce qui précède, certaines questions intéressantes, pour aborder les théories générales par la voie la plus directe.

Dans ce qui va suivre, nous nous proposons de développer ces questions, sous forme de notes.

NOTE I.

Considérations historiques sur les poudres sans fumée.

212. Il nous paraît utile de reproduire les principaux faits se rattachant à l'histoire des poudres modernes, à base de cellulose (coton, bois, papier...).

Schönbein, professeur à Bâle, annonça en 1846 qu'il était arrivé à préparer, avec du coton, un composé explosif d'une puissance extraordinaire.

A partir de ce moment l'attention des chimistes fut appelée sur le nouvel agent explosif qui reçut, en Allemagne, le nom de coton à tirer (Schieswolle), en Angleterre, celui de coton à canon (gun cotton), et en France, ceux de coton-poudre, pyroxile ou fulmi-coton. (*)

Malgré les soins apportés dans les recherches, on n'arriva à aucun résultat favorable. Le nouveau produit fut rejeté parce qu'il donnait lieu à des *décompositions spontanées.*

213. Vers 1860, on reprit en Autriche l'examen des propriétés du fulmi-coton.

Le général Uchatius fit de nombreuses expériences, en vue d'étudier l'action du coton-poudre dans les armes, en comparant (à l'aide du poinçonneur Rodman) les pressions produites en divers points d'un canon de fusil, par des charges de poudre noire et de fulmi-coton.

(*) On sait que le coton-poudre s'obtient par l'action de l'acide azotique sur le coton.

On sait aussi que les produits de la décomposition du coton-poudre consistent principalement en acide carbonique, en oxyde de carbone, en vapeur d'eau, et qu'il n'y a pas de *résidus.*

L'oxyde de carbone, gaz très délétère, apparaît en grande proportion dans les produits de la combustion, aussi faut-il recourir à une *ventilation très énergique* quand une explosion est provoquée dans un local.

Voici les résultats obtenus par le général Uchatius :

POUDRE NOIRE.		COTON-POUDRE.		OBSERVATIONS.
Charge en grammes.	Pression en atmosphères.	Charge en grammes.	Pression en atmosphères.	
4,872	141	1,218	216	La chambre du fusil lisse avait une longueur de 27 mm. ; elle pouvait contenir, au maximum, 48g72 de poudre noire. Les expériences étaient faites de manière à obtenir la même vitesse initiale dans les épreuves comparatives.
9,744	247	2,136	512	
14,616	302	3,654	736	
19,488	348	4,872	1067	
24,360	384	6,090	1436	
29,232	469	7,308	1792	
34,104	547	8,526	2005	
39,976	555	9,744	2463	
43,848	569	10,962	2624	
48,720	640	12,180	3200	

De ces chiffres il déduisit les conclusions suivantes :

1° Une partie en poids de coton-poudre équivaut, au point de vue balistique, à quatre parties en poids de poudre noire.

2° A égalité d'effet utile, la pression maximum des gaz du coton-poudre vaut à peu près quatre fois celle de la poudre ordinaire.

Ainsi, le nouveau produit était extrêmement brisant, il devait mettre en très peu de temps les armes à feu hors de service.

214. On imagina alors différents procédés de chargement pour maîtriser l'action du nouvel explosif.

Voici, par exemple, le moyen préconisé par le général autrichien Lenk, pour constituer les charges de tir des canons de campagne :

Il employait le coton-poudre en fibres tressées, qu'il disposait sur un cylindre creux en bois, à parois minces, fermé aux deux bouts.

Lorsqu'on provoquait la combustion, les parois du cylindre cédaient à l'action des gaz, ce qui augmentait la capacité de la chambre et diminuait les pressions dans l'âme.

Ce procédé de chargement était peu pratique et la préparation du fulmi-coton tressé n'était pas exempte de danger ; en effet, des accidents surgirent un jour au cours de la fabrication, et jetèrent de nouveau le discrédit sur le nouvel agent.

215. Au moment où la question du coton-poudre subit, en Autriche, ce triste dénouement, elle reprit un nouvel essor en Angleterre.

M. Abel, directeur du laboratoire de chimie à Woolwich, réussit à mettre le nouveau produit à l'abri des explosions fortuites, dues à un commencement de décomposition, en donnant à la masse explosive une certaine alcalinité par l'absorption d'une petite quantité de carbonate de soude, et en la *comprimant, après lui avoir fait absorber de l'eau (n° 92).*

Il obtint ainsi un produit d'une conservation sûre, mais d'une inflammation difficile par les moyens connus jusqu'alors, ce qui ne permit pas l'emploi de la substance dans les armes de guerre ; on put en tirer parti pour le chargement des projectiles creux. (*)

216. Des expériences intéressantes ont été faites, en vue de rechercher la relation qui existe entre l'effort de compression et la densité obtenue par le fulmi-coton Abel.

(*) Ce qui a contribué à développer l'usage du coton-poudre Abel, c'est la découverte des effets de l'amorce au fulminate de mercure sur le fulmi-coton humide et comprimé *(nos 71 et 92).*

La substance explosive fut alors mise en service dans certains pays, notamment pour le chargement des obus torpilles.

Plus tard on expérimenta le coton-poudre humide paraffiné (mélange de coton-poudre et de paraffine).

On lui reconnait aujourd'hui les avantages suivants :

Il n'exige pas le renouvellement de l'eau pour assurer la conservation en magasin du coton-poudre humide.

Il présente plus de résistance aux transports et conserve un poids constant.

Enfin ses propriétés explosives ne sont pas modifiées par l'eau de mer, avantage précieux quand il sert à la préparation des torpilles dormantes.

Voici les résultats des mesures :

Composition de la charge.	Densité donnée au coton-poudre par la compression. kil. — d³.	Pression indiquée par le dynamomètre. kil.	Pression correspondante par centimètre carré de surface.
Galette de 250 gr.	0,759	0	Inférieure à 13 kil.
»	0,957	63	800
»	1,080	90	1130
Cylindre de 50 gr.	1,420	29	3740
»	1,600	40	5030

On voit que les pressions nécessaires pour accroître un peu la densité de la substance augmentent très rapidement.

217. Vers 1884, M. Vieille découvrit l'action de certains *dissolvants* (éther acétique, éther sulfurique...) sur le coton nitrifié, ce qui lui permit de produire une masse gélatineuse, colloïdale. En soumettant celle-ci à la compression, il put obtenir des feuilles d'épaisseur déterminée, que des machines spéciales découpaient ensuite en grains.

La nouvelle poudre, essayée d'abord dans les fusils, fut tirée ensuite dans les bouches à feu ; elle donne actuellement des vitesses initiales relativement grandes avec des pressions modérées ; elle brûle sans fumée.

218. La découverte de M. Vieille, en France, ne devait pas rester sans écho à l'étranger ; vers 1888 M. Nobel conçut une autre poudre à base de nitroglycérine.

Nous avons dit *(n° 184)* qu'il existe maintenant un grand nombre de poudres sans fumée, qui dérivent de la poudre Vieille, ou de la poudre Nobel.

Les premiers échantillons de poudre, préparés par M. Nobel, contenaient 70 °/₀ de nitroglycérine et 30 °/₀ de nitrocellulose.

Depuis, on a observé l'influence produite par un excès de l'une ou de l'autre de ces substances explosives, sur la consistance de la masse ; ainsi, quand la poudre contient plus des deux tiers de nitroglycérine, elle reste molle et les grains sont trop déformables. Au contraire, si la proportion de nitrocellulose domine, on constate que la matière devient très dure et difficile à grener.

219. Nous avons montré *(n° 184)* que les poudres à la nitroglycérine ont, au point de vue balistique, des avantages très réels sur les produits à la nitrocellulose pure. En outre, il parait, que les poudres Nobel se travaillent plus aisément que les autres.

En revanche leur température de combustion est beaucoup plus grande *(note III)*, et cet élément influe considérablement sur la bonne conservation des armes à feu.

Enfin les poudres à la nitroglycérine se congèlent, semble-t-il, ce qui a pour effet de provoquer des ratés et une modification de leurs propriétés balistiques.

220. On adresse, à toutes les poudres sans fumée actuelles, le reproche de se comburer très irrégulièrement, ce qui a pour conséquence, on le sait, de produire des variations notables, d'un coup à l'autre, dans les pressions maxima et dans les vitesses initiales.

Voici quelques résultats d'expériences :

Désignation de la poudre sans fumée.	Vitesse initiale.			Pression à la culasse.			Observations.
	Maximum. m.	Minimum. m.	Différence. m.	Maximum. atm.	Minimum. atm.	Différence. atm.	
L³ de Wetteren, charge, 0k345.	453,2	432,2	21,0	1353	1110	243	Les expériences ont été faites, avec un canon de campagne de 7c5.
Landskrona, charge, 0k350.	446,0	404,5	41,5	1200	905	295	
Walsrode, charge, 0k415.	447,4	419,4	28,0	1047	865	182	

A quelle cause faut-il attribuer ce manque de régularité dans la combustion ?

Il est indispensable qu'une poudre ait pour base un corps bien défini chimiquement, c'est-à-dire, un produit ayant une composition moléculaire toujours identique. Or, il semble, que les poudres sans fumée ne possèdent pas encore cette qualité, à un haut degré ; la nitrification de la cellulose peut donner naissance à une variété de substances peu connues.

Les recherches qui se poursuivent amèneront, sans aucun doute, des améliorations dans cet ordre d'idées.

NOTE II.

Sur l'équation caractéristique des gaz.

221. Expériences sur la compressibilité des gaz. — Quand on diminue graduellement le volume d'un gaz, en le soumettant à une pression croissante et en le maintenant à une température invariable, on constate que la pression ne peut franchir une certaine limite sans changer l'état physique du corps. Dès que l'on atteint cette limite, une partie du gaz se transforme en liquide et la pression reste constante, si l'on diminue le volume.

La réduction progressive de la capacité amène enfin la liquéfaction totale, et alors le volume du corps, à l'état liquide, n'éprouve plus que de très faibles variations lorsque la pression croît de quantités considérables. (*)

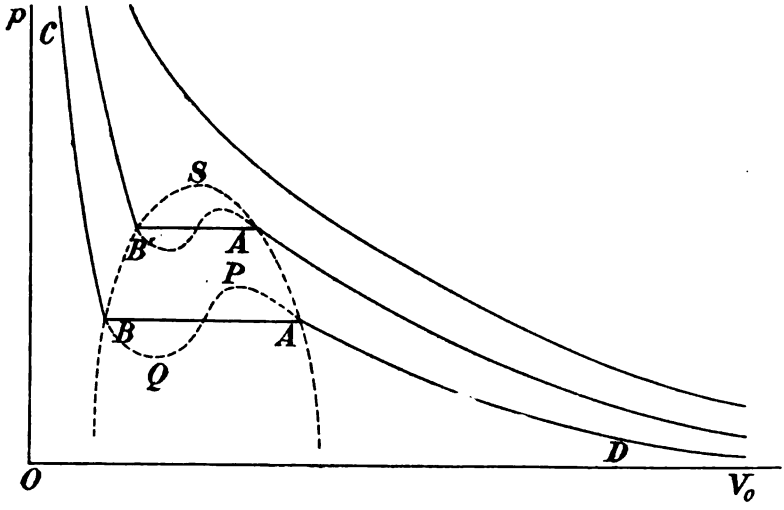
222. Représentation graphique des résultats. — L'ensemble de ces phénomènes peut se représenter par un diagramme, en prenant pour abscisse, le volume occupé par le corps sous l'unité de poids, et pour ordonnée, la pression correspondante.

On obtient ainsi une ligne composée de trois parties : un élément rectiligne AB parallèle à l'axe des volumes, compris entre deux éléments curvilignes AD et BC. Ils correspondent respectivement à la liquéfaction progressive de la masse, à l'état gazeux et à l'état liquide (fig. 43).

En un point quelconque de la droite AB la liquéfaction est donc partielle, et les distances de ce point aux extrémités A et B sont respectivement proportionnelles aux poids de liquide et de gaz qui coexistent en ce point.

(*) Les premières expériences, dans cet ordre d'idées, ont été entreprises par M. Andrews ; des recherches ultérieures ont confirmé ses résultats.

Supposons que ce diagramme ait été établi pour la température absolue T.



(Fig. 43)

Si l'on procède alors à de nouvelles expériences à une température T', supérieure à T, on constate que la partie rectiligne AB se trouve réduite; elle devient $A'B'$.

223. Température critique des gaz. — Il existe pour chaque gaz une température déterminée, dite *température critique* (que nous représenterons par T_s), pour laquelle la partie rectiligne du diagramme se réduit à un point S.

Aux températures supérieures à T_s, les diagrammes affectent la forme d'hyperboles équilatères.

Ainsi, la courbe qui se rapporte à la température T_s sépare deux régions du plan des axes. Dans la région inférieure, le fluide peut exister sous deux états distincts, liquide et gazeux, et dès lors, pour une température T et un volume V_0 connus, la pression reste indéterminée. Dans la région supérieure, à une température et à un volume donnés, correspond une pression déterminée.

224. Fonction caractéristique des fluides. — Plus tard M. Thomson modifia les *lignes isothermiques*, dont nous venons de parler, en vue de supprimer la discontinuité dans les courbes qui correspondent aux températures inférieures à la température critique. Il substitua à la partie rectiligne de chaque isothermique une courbe *BQPA*, se rattachant aux parties curvilignes *AD* et *BC*.

On put obtenir alors une représentation analytique des résultats d'expériences (*).

Clausius a été conduit à proposer la fonction suivante :

$$p = \frac{RT}{V_0 - r_i} - \frac{k}{T(V + \beta)^2},$$

dans laquelle :

p est la pression par unité de surface ;
V_0 le volume de la capacité contenant le fluide, sous l'unité de poids ;
T sa température absolue ;
R, r_i, β et k, des paramètres variant avec la nature du fluide.

225. Fonction caractéristique des gaz produits par les explosifs. — Si T est considérable, ce qui se présente pour les gaz engendrés par les explosifs, le calcul montre que le second terme de l'expression précédente est négligeable en présence du premier, et l'on obtient alors :

$$p = \frac{RT}{V_0 - r_i}.$$

C'est la forme de l'expression fondamentale admise dans ce travail *(n° 20)*.

(*) Différentes formules ont été proposées ; celle de Clausius paraît la meilleure.

226. Expériences de MM. Noble et Abel, sur la poudre noire. — Il est à remarquer que MM. Noble et Abel sont arrivés à une expression de même forme, pour représenter les pressions produites par les gaz de la poudre noire, bien qu'ils aient opéré d'une toute autre manière.

Voici, en principe, comment ils ont procédé :

Ils ont placé dans une capacité complètement close, des charges de poids différents et ils ont mesuré chaque fois, à l'aide du crusher, la pression maximum des gaz.

227. En transformant l'expression fondamentale, comme nous l'avons indiqué précédemment *(n° 50)*, de manière à la mettre sous la forme :

$$p = f\frac{\Delta}{1 - \eta\Delta},$$

ils ont pu comparer les résultats du calcul et de l'observation.

Comme le montre le tableau ci-contre, les valeurs calculées sont plus grandes ou plus petites que celles mesurées, suivant que la densité de chargement est inférieure ou supérieure à

$$\Delta = 0{,}9.$$

MM. Noble et Abel estiment qu'ils obtiennent ainsi une représentation plus exacte de la loi des pressions, dégagée de toutes les influences perturbatrices, et en particulier de la perte de chaleur par les parois. (*)

En somme les paramètres f et η ont été déterminés, par les expérimentateurs, de manière à tenir compte judicieusement de toutes les erreurs de mesure.

(*) Les différences constatées sont faibles, eu égard aux réserves à faire sur les indications de l'appareil crusher.

DENSITÉ DE CHARGEMENT. Δ $k - d^3$	PRESSION EN KILOGRAMMES par centimètre carré.		OBSERVATIONS.
	MESURÉE.	CALCULÉE.	
0,05	110	135	MM. Noble et Abel ont été conduits à choisir pour f et η les valeurs suivantes : $f = 2615 \quad K - c^2$; $\eta = 0,600 \quad d^3$.
0,10	232	277	
0,15	357	430	
0,20	513	595	
0,25	671	778	
0,30	839	955	
0,35	1022	1158	
0,40	1221	1375	
0,45	1440	1611	
0,50	1684	1866	
0,55	1958	2145	
0,60	2266	2450	
0,65	2614	2784	
0,70	3007	3154	
0,75	3448	3563	
0,80	3942	4020	
0,85	6495	4533	
0,90	5112	5112	
0,95	5801	5778	
1,00	6568	6552	

228. Interprétation physique du paramètre η. — Nous avons dit *(n° 11)* que le paramètre η se nomme covolume.

Les auteurs paraissent peu d'accord sur la signification physique qu'il faut accorder à η.

Certains le considèrent comme une quantité proportionnelle au volume spécifique des gaz, c'est-à-dire, au volume qu'ils occupent à la température de 0° centigrade et sous la pression atmosphérique normale. D'autres admettent qu'il représente la somme des volumes des molécules contenues dans l'unité de poids des gaz formés.

229. Si l'on accepte l'une ou l'autre de ces définitions, on ne peut pas, nous semble-t-il, envisager le covolume comme une véritable

caractéristique de l'explosif, puisqu'en vertu de l'hypothèse généralement admise sur la constitution des corps *(n° 10)*, les molécules ont un volume variable, eu égard aux mouvements et aux groupements atomiques.

La définition donnée dans ce cours, nous paraît mieux en concordance avec l'hypothèse en question ; elle permet de considérer γ comme une constante, que l'explosif se présente à l'état solide ou fluide.

230. Quelle que soit la signification physique attribuée à γ, on peut noter que le rapport du covolume au volume spécifique est une quantité sensiblement constante, pour tous les gaz.

Les premières déterminations sur ce point ont été faites par M. Sarrau.

Voici les résultats obtenus, pour quelques gaz, en prenant le décimètre pour unité :

NATURE DU GAZ.	RAPPORT.	COVOLUME.
Hydrogène	0,000887	9,900
Azote	0,001359	1,083
Oxygène	0,000890	0,621

Les divers nombres trouvés pour ces rapports diffèrent peu de 0,001.

NOTE III.

Sur les érosions qui se produisent dans les armes à feu.

231. État de la question. — L'emploi de certaines poudres sans fumée a mis en évidence des dégradations de l'âme, par érosion, susceptibles de nuire à la précision du tir et de mettre les armes à feu hors de service, après un petit nombre de coups. (*)

Ce défaut grave s'accuse plus, lorsqu'on met en œuvre des poudres à base de nitroglycérine, et c'est la raison de l'ostracisme dont elles ont été l'objet dans la plupart des armées européennes.

Comme nous l'avons dit *(note I)*, ces poudres présentent des propriétés balistiques remarquables, de sorte que, s'il était possible d'éviter ces érosions, par une modification n'altérant pas les qualités balistiques, leur emploi serait à recommander.

On a cherché à classer, par une méthode simple, les métaux, au point de leur facilité d'érosion, et les poudres, relativement à leur pouvoir érosif.

Des études ont été entreprises dans ce but dans divers pays, et notamment en Angleterre.

232. Caractères des érosions. — Les érosions ont été observées à l'intérieur des bouches à feu, soit en coupant une arme par un plan diamétral, soit au moyen d'un moulage à la gutta-percha ou au plâtre.

On a constaté des *craquelures*, dont la profondeur et la largeur augmentent avec le nombre de coups tirés.

Elles semblent dues au défaut d'obturation de la ceinture. Il s'y forme des interstices par lesquels les gaz tendent à s'échapper avec des vitesses incomparablement plus grandes que celles du projectile.

(*) D'après une étude sur les phénomènes d'érosions produits par les explosifs ; par M. Vieille.

L'action érosive paraît d'autant plus énergique que la vitesse du projectile est plus faible et la pression plus considérable, aussi les érosions se trouvent localisées, sur un ou deux calibres de parcours, à partir de l'origine des rayures. Plus loin, la vitesse du projectile est trop grande et la pression trop réduite pour que le débit gazeux, à travers de petits orifices, soit susceptible d'engendrer des actions appréciables.

233. En résumé, c'est à l'action réitérée d'une veine gazeuse, à haute température, s'échappant par de petits orifices, que l'on doit attribuer les érosions observées dans les armes à feu.

234. Principe de l'appareil servant à déterminer les éléments qui influent sur les érosions. — L'essai direct des métaux ou des poudres, par des tirs à outrance sur des armes en service, est impraticable, parce qu'il conduit à des dépenses excessives et qu'il ne peut s'étendre à l'étude méthodique des produits très variés fournis par l'industrie métallurgique.

C'est ce qui a conduit M. Vieille à imaginer l'appareil suivant :

Il se compose d'une chambre en acier, munie de trois tubulures, fermées par trois bouchons en acier, que nous nommerons A, B et C.

Le bouchon A sert à la mise de feu ; il contient un fil fin traversant une amorce ; ce fil peut être porté à l'incandescence par un courant électrique.

Le bouchon B renferme un manomètre à écrasement (crusher).

Le bouchon C reçoit une gaine métallique percée d'un canal axial de très faible diamètre, par lequel doit s'effectuer les fuites de gaz.

Les expériences se conduisent en modifiant les dimensions et le métal de la gaine ou *grain* ; et aussi, en changeant la nature de la poudre.

235. Mesure des érosions. — Le grain métallique par lequel s'échappe les gaz est pesé au milligramme. Après la combustion de la charge, il est essuyé et pesé de nouveau avec la même précision.

Dans les expériences de M. Vieille, la différence des poids variait de $0^g,150$ à 9^g ; elle était obtenue avec une approximation supérieure au $\frac{1}{100}$.

Cette variation de poids peut être traduite en volume, en tenant compte de la densité du métal.

Cette transformation est utile pour comparer des métaux de densités différentes.

236. Influence du diamètre du canal de fuite. — On a expérimenté des *grains de métal à canon*, dont le canal axial présentait les diamètres de 4^{mm}, 2^{mm} et 1^{mm}.

Voici les résultats de l'observation :

NATURE DE LA PRESSION.	Canal de 4^{mm} de diamètre.		Canal de 2^{mm} de diamètre.		Canal de 1^{mm} de diamètre.	
	Erosion. mm^3.	Pression. k.	Erosion. mm^3.	Pression. k.	Erosion. mm^3.	Pression. k.
Coton-poudre pur.	0,2	1244	6,9	2039	20,3	2403
	0,5	916	8,5	1938	22,7	2361
					24,7	2224
					25,5	2253
Poudre type balistite. (50 pour °/₀ de nitroglycérine.)	12,7	1084	58,6	2186	84,5	2509
	12,3	1268	58,2	2099	83,2	2370
					90,2	2542
					85,9	2360

Il résulte de ces nombres qu'une même charge de poudre produit des érosions *rapidement croissantes*, à mesure que le canal du grain devient plus petit.

L'augmentation du pouvoir érosif résulte de ce fait que le canal de fuite ne travaille que par sa périphérie. (*)

236. Influence de la longueur du canal de fuite. — Les expériences suivantes ont été faites sur des grains percés suivant l'axe d'un canal de 1^{mm} de diamètre et de 10^{mm}, 20^{mm} ou 40^{mm} de longueur.

Les résultats de l'observation sont inscrits dans le tableau suivant :

Nature des Poudres et Poids des Charges.		Grains de 10mm.		Grains de 20mm.		Grains de 40mm.	
		Erosion. mm³.	Pression. k.	Erosion. mm³.	Pression. k.	Erosion. mm³.	Pression. k
Coton-poudre pur.	3g,35	9,2	2200	"	"	19,5	2162
	3g,55	11,4	2343	13,8	2282	24,7	2224
		11,0	2234				
Balistite (50 °/o de nitroglycérine).	3g,55	39,9	2380	57,3	2485	90,2	2542
		33,8	2476				
Cordite, à température de combustion réduite par l'addition de sels.	3g,55	11,92	2504	"	"	30,0	2375

Ces nombres montrent :

1° Qu'en augmentant la longueur du canal par lequel s'échappent les gaz, le rendement érosif d'une même charge croit, dans le rapport

(*) Le volume de l'éprouvette était de 17,8 c³ ; la densité de chargement était égale à 0,2 (d — k).

de 1 à 2,5, lorsqu'on passe d'un grain de 10 à un grain de 40^{mm} de hauteur.

2° Que le classement des explosifs, au point de vue érosif, reste le même quelle que soit la longueur du canal de fuite.

237. Influence de la quantité de gaz débitée par le canal de fuite, sous une même pression maximum. — Cette influence peut être étudiée en disposant des grains métalliques identiques sur des chambres de capacité variable, et en déterminant les charges de façon à réaliser la même densité de chargement, et par suite, la même pression maximum.

On a expérimenté des chambres de 343,7 c^3, de 73,8 c^3 et de 17,8 c^3. La pression maximum des gaz s'élevait à environ 2500 k.

Voici les résultats de quelques mesures se rapportant à l'acier pour bouches à feu :

NATURE DES POUDRES.	Densité du Chargement.	Chambre de 343,7 c^3.		Chambre de 73,8 c^3.		Chambre de 17,8 c^3.	
		Erosion. mm^3.	Erosion par gramme.	Erosion. mm^3.	Erosion par gramme.	Erosion. mm^3.	Erosion par gramme.
BF. (poudre française).	0,2	393 392 374	5,5	109,2 105,1	7,3	20,1 20,3 22,7 24,7 25,5	6,4
Cordite (poudre anglaise pour fusils).	0,2	738	10,2			64 2	18,0

De ces essais on peut conclure que le rendement érosif par gramme d'explosif est d'autant plus grand que la charge est moindre, pour une même pression maximum.

239. Influence de la réitération des fuites gazeuses. — Il s'agit de montrer l'influence de la répétition des épreuves sur le classement des métaux et des poudres, au point de vue des érosions.

Les expériences ont été faites en mesurant à l'aide de l'éprouvette de 17,8 c^3 les valeurs des érosions successives produites sur un même grain, sous l'influence de fuites provenant de la combustion de charges identiques.

On a rapproché, dans les tableaux suivants, des érosions observées, les valeurs calculées en supposant que l'action décroisse en raison inverse de la racine carrée du nombre de fuites.

M. Vieille admet donc la formule :

$$E = \frac{e}{\sqrt{N}},$$

dans laquelle e représente l'effet après la première épreuve, N le nombre d'épreuves et E l'érosion finale.

Nous ne donnons les résultats que pour quelques poudres.

POUDRE BF.
DENSITÉ DE CHARGEMENT : 0,2.

NOMBRE DE FUITES.	ÉROSION EN MILLIGRAMMES.		PRESSION EN KILOGRAMMES par centimètre carr.
	OBSERVÉE.	CALCULÉE.	
1re fuite	193	193	2224
2e "	134	136	2215
3e "	103	111	2014
4e "	98	96	2014
5e "	103	86,3	2044
6e "	71	78,8	2084
7e "	62	72,9	1994
8e "	65	68	1742
9e "	56	64	1860
10e "	49	61	1855

BALISTITE (50 °/₀ DE NITROGLYCÉRINE).
DENSITÉ DE CHARGEMENT : 0,2.

NOMBRE DE FUITES.	ÉROSION EN MILLIGRAMMES.		PRESSION EN KILOGRAMMES par centimètre carré.
	OBSERVÉE.	CALCULÉE.	
1re fuite	704	704	2542
2e "	549	498	2084
3e "	477	406	1989
4e "	423	352	1725
5e "	338	315	1628

DYNAMITE A 75 °/₀ DE NITROGLYCÉRINE
DENSITÉ DE CHARGEMENT : 0,2.

NOMBRE DE FUITES.	ÉROSION EN MILLIGRAMMES.		PRESSION EN KILOGRAMMES par centimètre carré.
	OBSERVÉE.	CALCULÉE.	
1re fuite	470	470	2084
2e "	324	332	1802
3e "	249	271	1785
4e "	227	235	1855

POUDRE NOIRE (DE CHASSE).
DENSITÉ DE CHARGEMENT : 0,5.

NOMBRE DE FUITES.	ÉROSION PAR MILLIGRAMMES.		PRESSION EN KILOGRAMMES par centimètre carré.
	OBSERVÉE.	CALCULÉE.	
1re fuite	312	312	1839
2e "	203	220	1958
3e "	99	180	1860
4e "	132	156	1881

Ces nombres montrent que les érosions observées, produites par la répétition des fuites, suivent, très approximativement, pour toutes les poudres, la loi

$$E = \frac{e}{\sqrt{N}},$$

et dès lors, le *classement* des poudres ou des métaux, déterminé par la première épreuve, est semblable à celui auquel on arriverait si l'on procédait à des expériences réitérées.

On voit également que les pressions maxima mesurées décroissent progressivement.

240. Influence de la pression. — On peut déterminer l'influence de la pression de deux manières :

1° En conservant la même chambre et en augmentant la charge.

2° En opérant à charge constante et en modifiant la capacité de la chambre de façon à faire varier la densité de chargement.

Dans le tableau suivant nous reproduisons les expériences faites en ne modifiant que la charge. (*)

CHAMBRE DE 17,8 C³.

NATURE DE LA POUDRE	DENSITÉ DE CHARGEMENT.	PRESSION. kg.	ÉROSION. mm³.	RENDEMENT ÉROSIF PAR GRAMME. mm³.
BF.	0,2	2253	25,5	7,2
	0,281	3500	41,1	8,23
		3614	40,0	8,00
Balistite.	0,2	2360	85,9	24,2
	0,281	3886	124,8	24,4

De ces chiffres on déduit que le rendement érosif par gramme est à peu près constant, pour une même poudre, bien que les pressions aient presque doublé.

(*) Lorsqu'on augmente la charge, l'érosion dépend alors de la modification simultanée de la charge et de la pression ; il faut donc deux expériences pour mettre bien en évidence l'influence particulière de la pression.

Voici maintenant les résultats auxquels on arrive en appliquant le second procédé :

CHAMBRE DE 343 c³.			CHAMBRE DE 49,7 c³.			CHAMBRE DE 17,8 c³.			CHAMBRE DE 11,8 c³.		
Charge. gr.	Érosion. mm³.	Pression. kg.	Charge. gr.	Érosion. mm³.	Pression. kg	Charge. gr.	Érosion. mm.	Pression. kg.	Charge. gr.	Érosion. mm³.	Pression. kg.
BF (poudre française).											
3,55	0,3	100	3,90	5,9	906	3,45	20,3	2403	3,55	30,6	4128
							22,7	2361		26,4	3876
						3,55	24,7	2227			
							25,5	2253			
							20,1	2143			
Balistite.											
3,55	0,0	100	3,50	40,6	879	3,45	84,5	2509	3,55	85,7	3807
							83,2	2370			
Cordite.											
						3,55	64,2	2500	3,55	64,5	3710

Il résulte de ces nombres que l'érosion produite par une même masse gazeuse augmente considérablement quand la pression s'élève de 900 à 2500 kg., au delà l'influence est moins sensible, et le débit gazeux total, proportionnel à la charge, constitue alors l'élément efficace, comme dans les essais précédents.

241. Influence de la vivacité de la poudre. — En vue de mettre en lumière l'influence de la vivacité de la poudre, M. Vieille a employé le crusher enregistreur.

Voici les résultats des expériences faites sur deux échantillons d'une poudre balistite (50 % de nitroglycérine), ne différant que par les dimensions des grains.

ÉPROUVETTE DE 17,8 c³.

Poudre.	Charge.	Pression.	Erosion.	Erosion par gramme.	Durée de combustion.
	gr.	kg-c².	mm³.	mm³.	millièmes de seconde.
vive.	3,55	2597	83,6	23,5	0,9
lente.	3,55	2416	84,5	23,8	2,4

La poudre lente paraît avoir une action plus érosive.

242. Influence de la nature des explosifs sur la grandeur de l'érosion. — Les essais ont été étendus aux principales poudres en usage dans les armes à feu.

Les matières étaient mises préalablement sous forme de poudres vives, afin que la pression maximum observée avec fuite, fût toujours très voisine de la pression en vase clos, correspondant à la densité de chargement adoptée.

Enfin, les expériences ont été conduites en employant un grain du métal à canon.

Voici les résultats des mesures :

ÉPROUVETTE DE 17,8 c³.

Charge. gr.	Pression. k — c².	Erosion. mm³.	Erosion par gramme. mm³.	Force spécifique. k — c².	Température absolue.
Poudre à base de coton-poudre pur :					
T bis (pour revolvers).					
3,55	<2528	26,4	7,4		
BF. (pour fusils).					
3,45	2403	20,3	5,88		
3,50	2361	22,7	6,58		
3,55	2224	24,7	6,96 } 6,40	9600	2676°
3,55	2253	25,5	7,19		
3,55	2143	20,1	5,66		
Poudres à base de nitroglycérine :					
Balistite (50 % de nitroglycérine).					
3,47	2509	84,5	24,3		
3,51	2370	83,2	23,7		
3,55	2542	90,2	25,4 } 24,3	10000	3384°
3,55	2360	85,9	24,2		
3,55	2416	84,5	23,8		
Cordite.					
3,55	2500	64,2	18,1	10000	
Poudre noire :					
Poudre pour fusils.					
10,00	2167	22,3	2,2	3000	2910

De ces nombres on peut conclure ce qui suit :

1° Les poudres sont d'autant plus érosives que leur température de combustion est plus élevée.

2° Les poudres à base de nitroglycérine sont, environ, 4 fois plus érosives que celles au coton-poudre pur.

D'autres résultats, obtenus par M. Vieille, permettent de prévoir qu'en associant des poudres très érosives avec des matières très faiblement érosives, on pourra obtenir des produits présentant un pouvoir érosif intermédiaire qu'il sera possible de graduer à volonté par la proportion des composants. (*)

243. Influence de la nature du métal à canon. — Les expériences comparatives faites sur les divers aciers, employés dans la construction des armes à feu, montrent qu'aucun de ces corps ne présente une supériorité bien marquée au point de vue de la résistance à l'érosion ; c'est dans l'explosif et non dans le métal de l'arme qu'il faut chercher le remède, semble-t-il.

Quant au cuivre rouge, sa résistance à l'érosion est de l'ordre de celle des aciers, et c'est sans doute sa facilité de fabrication qui a conduit à généraliser son emploi pour la réparation des grains de lumière des bouches à feu.

244. Résumé. — Des travaux très remarquables de M. Vieille, on peut déduire les conclusions générales suivantes :

1° L'action érosive est plus grande lorsqu'on utilise les poudres à base de nitroglycérine, parce que leur température de combustion est supérieure à celle des produits à base de nitrocellulose pure, toutes choses égales d'ailleurs.

2° L'érosion croît, avec la pression maximum des gaz, toutes choses égales d'ailleurs.

3° L'emploi des poudres lentes, agissant plus longtemps que les

(*) M. Vieille emploie la « nitroguanidine » pour abaisser le pouvoir érosif des poudres.

poudres vives, pour communiquer au projectile un même déplacement, doit conduire à une usure plus rapide des armes à feu.

4° Les différents aciers à canon se présentent à peu près, dans les mêmes conditions au point de vue érosif.

5° On peut atténuer le pouvoir érosif des poudres, en y associant des matières abaissant leur température de combustion, mais c'est, nous semble-t-il, au détriment de leur puissance et de leur régularité.

245. Moyens à la disposition du constructeur pour empêcher ou atténuer l'action érosive des gaz. — Plusieurs moyens ont été préconisés pour empêcher ou atténuer l'action érosive des gaz, sur les parois des armes à feu.

M. Maxim a disposé à l'arrière du projectile un véritable obturateur plastique ; il est formé d'un métal mou qui se comprime entre le corps du projectile et un culot mobile, de manière à obturer les joints.

M. Longridge veut que les canons soient garnis d'un tube intérieur mince, destiné à être remplacé après usure.

Ces deux solutions nous paraissent peu pratiques ; l'emploi des projectiles avec ceintures renforcées répond mieux au but poursuivi.

Mais il y aurait avantage, nous semble-t-il, à modifier un peu le tracé généralement admis pour la ceinture.

Celle-ci devrait comprendre (*) une partie tronconique se raccordant, vers l'arrière, à une partie cylindrique.

---

*) Abstraction faite des détails.

NOTE IV.

Sur la loi reliant la vitesse de combustion à la pression des gaz.

246. Quelle est la relation qui existe entre la vitesse de combustion $\frac{dz}{dt}$ et la vitesse p des gaz formés (*n*os *56* et *57*) ?

Bien que de nombreuses expériences aient été faites, on paraît peu d'accord sur la solution de cette question importante.

On a supposé pendant longtemps que les réactions chimiques se propageaient dans une masse explosive, telle qu'une galette de poudre noire, avec une vitesse indépendante de la pression extérieure.

247. Influence de la pression. — Le général de Saint-Robert fit des essais pour déterminer l'influence des pressions inférieures à celle de l'atmosphère, sur la vitesse de combustion de la poudre noire.

Il introduisait cette substance explosive dans un tube en plomb, qu'il faisait passer ensuite à la filière, en vue de la transformer en une masse compacte et homogène. Le tube était divisé ensuite en plusieurs parties de longueurs égales.

En faisant brûler ces morceaux de tube à des altitudes différentes et en notant les durées de combustion correspondantes, le général de Saint-Robert a pu fournir une table, dont nous donnons plus loin un extrait.

D'après l'expérimentateur la formule qui représente l'ensemble des résultats est :

$$\frac{dz}{dt} = C\,p^{\frac{2}{3}}$$

C étant une constante dépendant de l'état de la poudre.

Pression. Millimètres.	Durée de combustion. Secondes.	Observations.
740,0	35,0	Chaque bout de tube avait une longueur de 40 c.
726,0	35,1	
724,3	35,2	
694,1	36,1	
618,7	38,8	
610,4	39,0	
559,4	41,5	
529,4	44,0	

248. Plus tard M. Castan fit des expériences à des pressions un peu supérieures à celle de l'atmosphère (5 atmosphères au maximum).

Il employait un tube d'acier fermé à l'une de ses extrémités et rempli de poudre noire comprimée ; il adaptait à l'orifice ouvert des bouchons filetés, percés pour l'échappement des gaz, de trous dont il faisait décroître le diamètre.

La composition brûlait dans le tube à une pression d'autant plus forte que la section de l'orifice d'écoulement était moindre, cette pression était mesurée à l'aide d'un dynamomètre.

Voici les résultats de l'observation :

Diamètre de l'orifice. mm.	Vitesse de combustion. m — s.
10	10,34
8	10,64
6	11,20
4	13,78

M. Castan a conclu de ces essais qu'à une augmentation de pression correspond toujours un accroissement de la vitesse de combustion. (*)

249. Les recherches qui précèdent ont été entreprises à de basses pressions et à l'aide d'appareils peu perfectionnés.

MM. Sebert et Hugoniot ont déduit d'expériences plus précises faites avec le vélocimètre *(n° 205)*, en tirant la poudre noire dans un canon de 10c, que

$$\frac{dz}{dt} = C p.$$

Les installations avaient été préparées de manière à rendre le recul libre.

Or, si la relation précédente est exacte, on sait que *(n° 114)* :

$$v = v_1 u = v_1 \frac{z}{Z},$$

et dès lors :

$$\frac{z}{v} = \frac{Z}{v_1} = R.$$

Ainsi, pour vérifier la loi admise, à priori, par les expérimentateurs, il s'agit d'établir que la quantité R est une constante.

(*) Pour étudier les lois de la combustion, le général Piobert fit brûler, à l'air libre, des baguettes prismatiques de poudre noire, enduites d'un corps gras sur les faces latérales, afin de réaliser la combustion par tranches parallèles.

En opérant avec des baguettes de poudre de densité, de section et de dosage différents, il a trouvé, le premier, les lois suivantes :

1° A l'air libre, la vitesse de combustion est constante et indépendante de la section de la baguette.

2° Cette vitesse varie en raison inverse de la densité de la poudre.

3° Elle est variable avec le dosage et le degré d'humidité.

Voici les résultats des mesures : (*)

Temps. Secondes.	Epaisseur brûlée. z Mètres.	Vitesse du projectile. v m — s.	Rapport $\frac{z}{v} = R$.	Observations.
0,000936	0,00061	38,7	0,00001576	Charge de poudre noire à grains irréguliers : 3k200. Epaisseur moyenne des grains : 12mm8. Poids du projectile : 12k. Bouche à feu : canon de 12c. La ceinture du projectile a été ajustée de manière à loger les cloisons.
0,001872	0,00109	81,9	1354	
0,002408	0,00220	150,6	1461	
0,003744	0,00403	226,5	1779	
0,004680	0,00618	302,2	1607	
0,005616	0,00656	351,8	1865	
0,006552	0,00790	391,8	1809	
0,008819	0,00850	454,0	1872	

MM. Sebert et Hugoniot ont conclu que le rapport $\frac{z}{v}$ n'éprouve que des variations insignifiantes eu égard à la difficulté des mesures, la moyenne arithmétique des valeurs de R étant *0,00001665*.

250. Les recherches antérieures ont été faites sur la poudre noire.

M. Vieille a procédé à de nombreux essais sur les poudres sans fumée. Les charges se comburaient en vase clos et les mesures étaient prises à l'aide du crusher enregistreur *(n° 208)*. (**)

(*) Mémorial de l'artillerie de marine, tome X.

(**) Mémorial des poudres et salpêtres, tome VI.

Voici quelques résultats :

Pression en kilogrammes par centimètre carré.	Vitesse de combustion. d — s.	Rapport de la vitesse de combustion à la pression.		Observations.
190	0,263	0,000100	0,000090	Poudre à base de nitrocellulose pure. $\Delta = 0,1$. Grains en lamelles.
289	0,274	94		
392	0,292	74		
530	0,474	89		
734	0,682	92		
732	1,574	0,000215	0,000175	Poudre à base de nitroglycérine. $\Delta = 0,3$. Grains en lamelles.
966	2,286	236		
1221	2,378	112		
1483	2,504	169		
1769	2,950	166		
2112	3,768	183		
2498	4,060	162		
2917	4,851	166		
3316	5,165	155		

251. En résumé, la vitesse de combustion est reliée à la pression des gaz par la relation générale :

$$\frac{dz}{dt} = C p^{\alpha},$$

et la valeur

$$\alpha = 1,$$

est celle qui tient le mieux compte, semble-t-il, de tous les résultats de l'observation. (*)

(*) Elle a été admise par M. Hugoniot, dans sa Pyrodynamique, et par le Colonel Mata, de l'artillerie espagnole, dans son excellent ouvrage de Balistique intérieure.

252. Influence du détonateur sur la vitesse de combustion. — Lorsque les explosifs sont soumis à l'action d'un détonateur, beaucoup d'auteurs admettent que les réactions se propagent dans la masse explosive, comme une onde sonore, mais avec une vitesse constante incomparablement plus grande.

Il nous semble que la vitesse de propagation des réactions chimiques doit croître avec la quantité de chaleur engendrée progressivement et par conséquent, avec la pression des gaz formés.

La relation précédente nous paraît applicable à tous les cas, en supposant, comme nous l'avons fait *(n°s 57 et 68)*, que le paramètre

$$C = \frac{\varphi_s}{f}$$

varie, non seulement avec la nature de l'explosif mais aussi avec le mode d'excitation.

Cette manière d'envisager la propagation est plus simple et plus générale ; elle permet d'expliquer les faits sans qu'il faille imaginer un mode spécial de transmission des réactions, une *onde chimique*.

NOTE V.

Formules de balistique simplifiées.

253. Grains de formes équivalentes au point de vue balistique. — Au début, on donnait aux grains des poudres sans fumée la forme en *paillette* (petite lame quadrangulaire) et les dimensions de ces grains étaient prises à peu près au hasard.

Les formes en *bandelette* et en *corde* ont aujourd'hui quelques partisans ; quant aux grains *tubulaires*, d'une fabrication plus difficile, ils ne sont guère en faveur.

La forme du grain doit être choisie, nous l'avons dit *(n° 174)*, de manière à rendre la combustion progressive, c'est-à-dire, de façon à communiquer au projectile, pendant la combustion de la charge, la plus grande impulsion totale $\int_0^T p\,dt$, avec la plus petite pression maximum.

Pour atteindre ce résultat, il faut que le diagramme obtenu, en rapportant à un système de deux axes rectangulaires les valeurs de

$$u \quad \text{et de} \quad F(u),$$

se confonde sensiblement avec une ligne droite, et alors on obtient :

$$F(u) = M(u) = u. \tag{94}$$

Toutes les formes de grain qui vérifient cette condition sont *équivalentes* au point de vue balistique.

Pour s'assurer, d'une manière simple, si elle est satisfaite, il suffit de calculer comme nous l'avons expliqué *(n°s 43 et 44)*, la valeur de

$$M(1) ;$$

elle doit différer très peu de l'unité.

254. Selon nous, rien ne justifie cette variété de la forme des grains, la lamelle convient à toutes les armes à feu, sous réserve de calculer judicieusement ses dimensions.

L'épaisseur $2Z$ du grain varie avec les conditions de tir imposées à l'arme à feu, quant à la largeur b elle est déterminée par la relation (94), et celle-ci est vérifiée quand on adopte :

$$l \leqq \frac{1}{10} \leqq \frac{2Z}{b}.$$

255. Lois du mouvement du projectile, pendant la combustion de la charge, pour des grains de formes équivalentes. — Si nous tenons compte de la relation (94), nos formules se simplifient considérablement.

La vitesse du projectile en fonction de la variable u s'exprime, comme précédemment, par la relation :

$$v = v_1 u. \qquad \text{(47bis)}$$

256. L'expression du chemin parcouru par le projectile en fonction de u, se réduit à :

$$1 - \left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^{n-1} = Au. \qquad \text{(48bis)}$$

257. La pression est reliée à u par la formule :

$$p = \frac{fQ}{S\lambda} u \left(1 - Au\right)^{\frac{n}{n-1}}. \qquad \text{(52bis)}$$

Quant à la condition du maximum de pression, elle s'écrit comme suit :

$$A = \frac{1}{u_m + \frac{n}{n-1} u_m} = \frac{n-1}{(2n-1)\, u_m}, \qquad \text{(53bis)}$$

et, en remplaçant la quantité A par sa valeur (49), on trouve :

$$\frac{(n-1)(1-\rho)S^2fZ^2}{mQ\varphi^2} = \frac{n-1}{(2n-1)u_m},$$

ou, en simplifiant :

$$\frac{(1-\rho)S^2fZ^2}{mQ\varphi^2} = \frac{1}{(2n-1)u_m},$$

ce qui donne :

$$u_m = \frac{1}{(2n-1)} \cdot \frac{mQ\varphi^2}{(1-\rho)S^2fZ^2},$$

et la pression maximum devient :

$$P = \frac{fQ}{S\lambda} u_m \left(1 - Au_m\right)^{\frac{n}{n-1}}. \qquad (54\text{bis})$$

Or, on a : (53bis)

$$1 - Au_m = 1 - \frac{n-1}{2n-1} = \frac{n}{2n-1} = \frac{1,11}{1,22} = 0,91,$$

on peut donc écrire aussi :

$$P = 0,39 \frac{fQ}{S\lambda} u_m. \qquad (95)$$

257. L'expression de la durée du trajet en fonction de u se réduit à :

$$T = \frac{ZS\lambda}{\varphi Q} \int_0^1 \frac{1}{u\left(1 - Au\right)^{\frac{n}{n-1}}} du. \qquad (55\text{bis})$$

258. En éliminant la variable u entre les relations (47bis) et (48bis), on obtiendra :

$$v = \frac{v_1}{A}\left[1 - \left(\frac{\lambda}{x+\lambda}\right)^{n-1}\right], \qquad (97)$$

pour l'expression de la vitesse en fonction du chemin parcouru.

259. En opérant de même sur les formules (48bis) et (52bis), on aura :

$$p = \frac{fQ}{S\lambda A}\left(\frac{\lambda}{\lambda+x}\right)^n\left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda+x}\right)^{n-1}\right], \qquad (98)$$

pour la pression en fonction du déplacement x du projectile.

260. Lois du mouvement du projectile après la combustion de la charge. — Comme précédemment, la pression est exprimée par la formule *(n° 123)* :

$$p = \frac{fQ}{S\lambda}\left(\frac{\lambda}{\lambda+x}\right)^n.$$

261. Quant à la vitesse, elle est donnée par l'expression simplifiée suivante :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1-\rho}{n-1}fQ\left\{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda+x}\right)^{n-1} - \frac{A}{2}\right\}, \qquad (56\text{bis})$$

et on trouve alors, pour valeur de l'effet utile :

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1-\rho}{n-1}fQ\left\{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda+X}\right)^{n-1} - \frac{A}{2}\right\}. \qquad (57\text{bis})$$

NOTE VI.

Sur le recul des armes à feu.

262. Détermination expérimentale du coefficient θ. — Nous avons trouvé *(nos 144 et 145)*, dans le cas du recul libre, l'équation :

$$mv_0\left(1+\theta\frac{m'}{m}\right)-M\psi_0=0, \qquad \text{(66bis)}$$

entre la vitesse ψ_0 de la masse reculante et la vitesse initiale v_0 du projectile, ainsi que la relation :

$$mX\left(1+\theta\frac{m'}{m}\right)-mY=0, \qquad \text{(67bis)}$$

entre les déplacements Y et X correspondants.

Pour un déplacement quelconque x du projectile dans l'âme, nous aurons les formules :

$$mv\left(1+\theta\frac{m'}{m}\right)-M\psi=0, \qquad (99)$$

et

$$mx\left(1+\theta\frac{m'}{m}\right)-My=0. \qquad (100)$$

Pour arriver à ces divers résultats, il a fallu considérer θ comme une constante, et nous avons dit *(n° 146)* que l'on peut poser :

$$\theta=\frac{1}{2},$$

pour toutes les poudres.

Nous allons résumer maintenant les expériences qui ont été faites en vue de la détermination de θ.

263. MM. Sebert et Hugoniot ont mesuré, à l'aide du vélocimètre, les valeurs de y et de ψ, après des temps déterminés, en prenant les dispositions nécessaires pour rendre le recul libre.

Les expériences ont été faites en tirant la poudre noire dans un canon de 10c. (*)

Dans le tableau suivant, nous donnons les résultats de quelques mesures.

Temps.	Espace parcouru par la masse reculante.	Vitesse du recul.	Accélération du recul.	Observations.
Secondes.	Mètres.	m — s.	m — s.	
0,000000	0,00000	0,000		Le poids de la charge est de 3k,200.
936	28	0,433	462,61	Le poids du projectile est de 12k.
1872	81	0,918	518,16	La ceinture du projectile est ajustée dans les rayures.
2808	200	1,687	821,58	Le poids de la masse reculante est de 1214k.
3744	397	2,537	908,12	
4680	685	3,386	907,05	
5616	1031	3,941	592,95	
6552	1423	4,389	478,63	
8892	2559	5,108	307,26	
12636	4593	5,726	165,06	
16380	6851	6,186	122,86	
20124	9179	6,324	36,86	
29484	15223	6,554	23,50	
42588	23993	6,742	13,93	
51948	30230	6,680		

Les expérimentateurs connaissaient, par des essais faits antérieurement, les déplacements et les vitesses du projectile dans l'âme, ce qui leur a permis de constater, à l'aide des formules (99) et (100) et

(*) Mémorial de l'artillerie de marine, tome X.

des résultats des observations ci-dessus, que les variations de θ sont faibles et que la valeur moyenne de cette quantité est $\frac{1}{2}$.

Des chiffres du tableau précédent, on peut déduire aussi les conclusions suivantes :

1° La vitesse de recul maximum est 6,744 m.

2° L'espace parcouru par la masse reculante, qui correspond à ce maximum, est 0,248 m.

3° L'accélération du recul augmente très rapidement pour décroître ensuite lentement.

264. Plus tard, des expériences ont été entreprises par M. le commandant Journée, à l'école normale de tir de France, en mettant en œuvre différentes poudres.

Il a trouvé une erreur moyenne de $\frac{1}{500}$, entre les vitesses initiales mesurées et celles déduites de la formule (66bis), en adoptant dans le calcul :

$$\theta = \frac{1}{2},$$

pour toutes les substances essayées.

265. Vitesse de recul maximum. — Si l'on compare la vitesse de recul ψ_0 qui correspond à la sortie du projectile du canon, à la vitesse de recul maximum ψ_m, on constate qu'elles diffèrent notablement.

En conséquence, si l'on pose *(n° 147)* :

$$\theta' = \frac{\psi_m}{\psi_0},$$

la quantité θ' sera supérieure à l'unité.

Cela tient à ce que les produits de la combustion reçoivent une plus grande quantité de mouvement, à l'instant où le projectile

franchit la tranche de la bouche, et qu'il doit en résulter une augmentation correspondante de la quantité de mouvement du recul. (*)

266. Des expériences ont été faites pour déterminer la part d'influence de la nature de la poudre, du poids du projectile, du calibre et de la longueur de l'arme, et partant de la vitesse initiale, sur la valeur de θ'.

Les résultats de l'observation sont condensés dans la formule suivante :

$$\theta' = \frac{1 + \frac{1}{2}\frac{m'}{m}}{1 + \gamma\frac{m'}{m}},$$

dans laquelle la quantité γ est reliée à la vitesse initiale v_0 par la relation :

$$\gamma = 2{,}30 - 0{,}001\, v_0,$$

applicable pour des valeurs de v_0 comprises entre 0 et $1000\, m$. (**)

(*) Si l'on fait abstraction de toutes les résistances extérieures, le centre d'inertie des masses en mouvement est un point fixe.

(**) Quand on emploie la poudre noire, on trouve généralement une valeur peu différente de

$$\theta' = \frac{4}{3}.$$

NOTE VII.

Sur la perte de chaleur des gaz par les parois des armes à feu.

267. Le général de Saint-Robert entreprit des expériences, en vue de déterminer la quantité de chaleur communiquée par les gaz aux parois d'une arme à feu portative.

Il fit trois séries d'essais avec un fusil rayé, tirant la poudre noire. Dans la première série, le fusil était chargé à la manière ordinaire ; dans la deuxième, la balle était placée près de la bouche ; dans la troisième, l'arme tirait sans balle.

Voici les résultats de l'observation :

La perte de chaleur est la plus considérable, lorsque la balle est disposée près de la bouche ; elle est la moindre dans les conditions du tir ordinaire.

Il trouva que, dans ce dernier cas, la déperdition calorifique était d'environ 250 calories par kilogramme de poudre.

268. Plus tard, MM. Noble et Abel entreprirent des expériences avec une bouche à feu.

Ils disposaient d'une grande cuve, contenant un poids déterminé d'eau, dans laquelle ils pouvaient plonger le canon après le tir.

Au début de l'expérience, l'eau et le canon étaient amenés à la même température, et celle-ci était mesurée avec le plus grand soin.

Immédiatement après le tir, le canon était immergé et l'on déterminait ensuite la température de l'eau.

Tenant compte de toutes les causes d'erreur, les expérimentateurs ont fixé à 25 calories la quantité de chaleur perdue par kilogramme de poudre brûlée.

269. La quantité de chaleur transmise aux parois du canon est donc considérable, et c'est pour en tenir compte implicitement, que

les caractéristiques des explosifs ont été déterminées par des expériences se rapprochant le plus possible des conditions dans lesquelles ces substances sont utilisées *(nos 63 et 196)*. (*)

(*) Parmi les circonstances qui influent sur la déperdition de la chaleur, on peut citer :

1° Le rapport de la surface refroidissante au poids de la charge ; la perte d'énergie est relativement grande dans les armes à feu portatives ;

2° Le temps mis par le projectile pour parcourir l'âme ;

3° La nature du métal des parois ; l'état de leur surface.

NOTE VIII.

Considérations sur les résistances rencontrées par le projectile pendant son mouvement dans l'âme.

270. Lorsqu'un projectile se meut dans une arme à feu, il doit vaincre, on le sait, de nombreuses résistances, parmi lesquelles les plus importantes sont celles relatives au forcement du projectile, au tracé des rayures et aux résidus de la poudre. (*)

271. Influence du forcement. — Les résistances rencontrées par le projectile pendant son trajet dans l'âme, n'ont pas toutes pour effet, de réduire sa vitesse initiale. Ainsi, le forcement provoque, au début, une combustion plus vive de la charge, à cause de l'élévation des pressions provenant du retard dans les premiers déplacements du projectile, et il en résulte un accroissement de l'effet utile de la poudre, toutes choses égales d'ailleurs.

Le forcement augmente donc un peu la vitesse initiale du projectile ; mais s'il est trop fort, la tension intérieure des gaz peut devenir exagérée et compromettre la solidité du canon *(n° 155)*.

272. La résistance créée par le forcement dépend du métal choisi pour la formation des tenons du projectile.

(*) D'après M. Longridge, voici comment l'énergie totale de la charge est dépensée dans un canon de côte :

	Pour °/₀ de l'énergie totale de la charge.
Force vive de translation du projectile	9,93
Force vive du recul	0,08
Force vive des produits de la combustion	1,97
Force vive de rotation du projectile	0,05
Travail absorbé par le frottement du projectile	0,07
Travail absorbé par le frottement des résidus	1,81
Travail de dilatation du canon	0,022
Energie calorifique transmise aux parois	0,591
Travail dû à l'expulsion de l'air	0,017
Energie emportée par les gaz dans l'atmosphère	85,45
	100,00

Conditions du tir.

Calibre de la bouche à feu : 254 mm. Poids du canon : 27 t. Parcours du projectile : 6,858 m. Poids du projectile : 136 k. Pression maximum : 2835 k — c². Vitesse initiale : 640 m — s. Energie totale de la charge : 41600 t — m.

On a essayé de mettre en évidence l'influence de la nature du métal, en mesurant la pression nécessaire pour engager complètement le projectile dans l'âme rayée.

Voici les résultats des mesures (*) :

NATURE DU MÉTAL DES TENONS DU PROJECTILE.	Pression nécessaire pour produire le forcement, en kilogrammes par centimètre carré de la section transversale de l'âme.
Plomb.	28,28
Alliage de 95 °/₀ de plomb et de 5 °/₀ d'étain.	37,55
Etain.	46,94
Zinc.	150,22
Cuivre.	271,50

273. Influence du tracé de la rayure sur la perte d'énergie de la poudre. — Des expériences ont été faites, en Angleterre, par M. Noble, pour déterminer la perte d'énergie inhérente au tracé de la rayure.

Il s'est servi de trois canons présentant les dispositions suivantes :

Le premier avait une rayure droite, c'est-à-dire, une rayure à directrice parallèle à l'axe du canon ; le deuxième, une rayure hélicoïdale ; et le troisième, une rayure progressive de même inclinaison finale que la précédente.

Les pertes d'énergie constatées dans ces trois canons étaient dans les rapports ci-dessous :

rayure droite,	1,00 ;
rayure uniforme,	1,52 ;
rayure progressive,	2,30.

274. Les résultats inscrits dans le tableau suivant, mettent bien en relief l'influence de toutes les particularités de la directrice de la rayure. (**)

(*) Revue d'artillerie, tome XIII.

(**) Les chiffres de ce tableau sont extraits de l'excellent ouvrage : Construction der gezogenen Geschützrohre, par Kaiser.

Renseignements divers.	Recherches de M. Noble.			Rayure uniforme. $\omega_2 = 4,5°$.		
	x. m.	Sp. t.	v. m.	Np_m. t.	R. t.	$\frac{R}{S}$. kg.
Calibre du canon, $c = 0,2542$ m.	0	0	0	0	0	0
Section transversale, $S = \frac{\pi c^2}{4} = 507$ cm².	0,1015	1572	125,26	69,6	17,02	33,58
Masse du projectile = 0,018513 t.	0,2880	1094	205,72	48,5	11,85	23,36
Rayon de giration du projectile, $r = 0,095$ m.	0,5590	793,6	266,07	35,2	8,59	16,95
$\left(\frac{2r}{c}\right)^2 = 0,56$.	0,8299	631	302,33	27,9	6,83	13,48
Coefficient de forcement, $\mu = 0,167$.	1,1008	518	328,55	23,0	5,61	11,06
Déplacement du projectile $= x$.	1,3715	431	349,27	19,0	4,67	9,21
Pression totale sur le culot $= Sp$.	1,6424	362	365,73	16,0	3,92	7,73
Vitesse du projectile correspondant au déplacement $x = v$.	1,9134	310	379,44	13,7	3,36	6,62
Pression normale totale sur les tenons $= Np_n$.	2,1843	272	390,72	12,0	2,95	5,81
Résistance totale $= R$.	2,4550	244	399,56	10,8	2,64	5,21
Résistance par unité de section $= \frac{R}{S}$.	2,7259	223,6	406,26	9,85	2,42	4,78
Inclinaison de la rayure en un point $= \omega$.	2,9968	208	411,14	9,25	2,25	4,44
Distance de l'origine de la parabole à l'origine de la rayure $= d$.						

Rayure progressive. $\omega_1 = 0$; $\omega_2 = 4,5°$.				Rayure progressive. $\omega_1 = 1°48'$; $\omega_2 = 4,5°$.				Rayure progressive. $\omega_1 = 2°$; $\omega_2 = 4,5°$.		
x. m.	Np_n. t.	R. t.	$\frac{R}{S}$. kg.	$x+d$. m.	Np_n. t.	R. t.	$\frac{R}{S}$. kg.	$x+d$. m.	R. t.	$\frac{R}{S}$. kg.
0	0	0	0	1,9978	0	0	0	2,3906	0	0
0,1015	7,07	1,20	2,36	2,0993	31,71	6,34	12,50	2,4921	33,10	13,28
0,2880	16,15	2,82	5,56	2,2858	29,16	5,92	11,67	2,6786	30,36	12,33
0,5590	25,79	4,68	9,24	2,5568	29,47	6,11	12,05	2,9496	29,85	12,21
0,8299	32,59	6,15	12,13	2,8277	30,69	6,49	12,80	3,2205	30,44	12,59
1,1008	37,79	7,40	14,60	3,0986	31,91	6,88	13,58	3,4914	31,12	13,24
1,3715	41,93	8,51	16,79	3,3693	32,82	7,22	14,24	3,7261	31,71	13,36
1,6424	45,19	9,49	18,73	3,6402	33,53	7,52	14,84	4,0330	32,18	13,68
1,9134	47,98	10,42	20,55	3,9112	34,35	7,85	15,48	4,3040	32,69	14,02
2,1843	50,37	11,30	22,28	4,1821	35,06	8,16	16,10	4,5749	32,27	14,41
2,4550	52,83	12,11	23,88	4,4528	35,77	8,48	16,73	4,8456	33,83	14,78
2,7259	53,96	12,87	25,38	4,7237	36,38	8,78	17,32	5,1165	34,31	15,13
2,9968	55,39	13,61	26,83	4,9946	36,89	9,05	17,86	5,3874	34,74	15,45

De ces chiffres, on peut déduire les conclusions suivantes :

1° Si l'on envisage la rayure uniforme, les quantités Np_n et R passent par un maximum en même temps que la pression des gaz sur le culot *(nos 161 et 162)*.

2° Si l'on considère la rayure progressive, les quantités Np_n et R augmentent de la culasse vers la bouche, dans le cas où $\omega_1 = 0$; et lorsque $\omega_1 = 2^\circ$, ces quantités varient peu.

275. Usure de la ceinture. — On entend généralement par usure de la ceinture la différence qui existe entre la largeur de l'empreinte faite dans la ceinture par une cloison, durant le trajet du projectile dans le canon, et la largeur même de la cloison.

On suppose que cette usure est produite par le frottement du flanc de tir, agissant sur le tenon, à la façon d'une lime d'autant plus mordante qu'elle est plus rugueuse.

D'après l'expérience et le calcul, l'usure peut être représentée, pour une rayure uniforme, par la formule :

$$e = K \frac{v_0^2 \, tg \, \omega_2}{N \lambda \rho_c},$$

dans laquelle les notations ont les significations suivantes :

e	usure ;
v_0	vitesse initiale ;
ω_2	inclinaison finale de la rayure ;
N	nombre des rayures ;
λ	hauteur de la ceinture ;
ρ_c	profondeur de la rayure ;
K	coefficient dépendant de la nature des surfaces frottantes.

Dans le cas de la rayure progressive l'usure est moindre ; on peut l'obtenir approximativement en remplaçant, comme précédemment *(n° 163)*, $tg \, \omega_2$ par $tg \, \omega_m$.

La valeur numérique du coefficient K se détermine par expérience.

276. Perte d'énergie due aux résidus de la poudre. — Les expériences, dirigées par M. Noble, prouvent qu'en tirant une poudre à résidus, on augmente notablement les frottements dans l'âme.

Afin de déterminer la perte d'énergie qui en résulte, on tirait un premier projectile de 45 livres (20^k400), dans un canon de 12^c, à la charge de 12 livres (5^k400) de poudre à résidus pebble, après avoir soigneusement nettoyé et graissé l'âme ; puis, on lançait successivement deux autres projectiles, sans enlever les résidus.

Après avoir lavé et graissé la bouche à feu, on recommençait un nouveau tir de trois coups, dans les mêmes conditions que précédemment.

Les vitesses obtenues avec le canon encrassé étaient moindres que celles réalisées avec l'arme nettoyée, et la perte d'énergie s'élevait à 2,73 % de l'effet utile de la charge.

TABLE DES MATIÈRES.

PRÉLIMINAIRES.

§ 1.

Définitions. — Objet de la balistique intérieure.

NUMÉROS.		PAGES.
1.	Définition d'un explosif. — Ce qu'on appelle amorçage . . .	1
2.	Moyens d'amorçage. — Indications relatives à la durée de production et à la température initiale des gaz	1
3.	La poudre noire	1
4.	Ce qu'on nomme poudre, dans l'état actuel.	2
5.	But de la balistique intérieure	2
6.	Diverses espèces de charges	3

§ 2.

De l'organisation des explosifs.

7.	Ce que nous entendons par organisation d'un explosif. . . .	4
8.	Etat physique des explosifs	4
9.	Composition chimique des explosifs	4
10.	Constitution mécanique des explosifs.	5

CHAPITRE I.

Les caractéristiques des explosifs.

§ 1.

Le covolume de l'explosif.

NUMÉROS. PAGES.

11. Définitions du covolume des gaz et du volume réduit de la chambre 7
12. Limite inférieure du volume réduit de la chambre 7
13. Hypothèse relative à la compacité des explosifs 8

§ 2.

De l'énergie d'un explosif.

14. Energie totale d'un explosif ; énergie potentielle ; énergie cinétique ; énergie spécifique. 9
15. Transformation de l'énergie, en vase clos 9
Comment il faut envisager l'explosif, au point de vue de l'énergie 10

§ 3.

Définitions et principes relatifs à la théorie des gaz.

16. But de la théorie des gaz 11
17. Quantité de chaleur des gaz 11
Tableau donnant les valeurs de l'énergie spécifique de quelques explosifs 12
18. Température absolue des gaz. Relation entre la température absolue et la température centigrade correspondante . . . 12
19. Ce qu'il faut entendre par pression des gaz en un point . . . 13
20. Fonction caractéristique des gaz engendrés par les explosifs . 14
21. Considérations se rapportant aux explosifs à résidus 16

§ 4.

De l'inflammation de la charge.

22-23. Ce qu'il faut entendre par stabilité des explosifs. 17
24. Explosifs d'amorce 17

NUMÉROS. PAGES.

25. Définitions de l'énergie de l'amorce ; de l'inflammation d'une masse explosive ; de la durée d'inflammation ; de la surface d'inflammation ; du coefficient d'inflammation. 18
26. Hypothèse relative à l'inflammation des charges de tir . . . 18
27. Divers types d'amorces 19
28. Choix de l'amorce 19
29. Tableau donnant les poids et les dimensions des amorces détonantes admises dans la pratique. 20

§ 5.

De la combustion de la charge.

30. Définitions de la combustion ; de la durée de combustion ; de la surface de combustion 21
31. Influence du type d'amorce sur la quantité de chaleur dégagée par la combustion. 21
32. Mode de combustion des explosifs. Ce qu'on nomme : combustion par surfaces parallèles ; fonction de forme 22
33. Expériences relatives au mode de combustion des explosifs. . 23
34. Fonction de forme des charges de rupture. 25
35 à 39. Fonctions de forme des charges grenées . . . . . 25 à 29
40. Propriétés de la fonction de forme $F(u)$, relative aux charges grenées 29
41. Comparaison des grains, au point de leurs formes 30
42 à 46. Propriétés et calculs relatifs à la fonction de forme $M(u)$. 31 à 34
47. Tables des fonctions de forme, pour les poudres en usage dans le pays 34

§ 6.

Pressions en vase clos, pendant la combustion de la charge.

48. Hypothèse sur la loi des pressions, pendant la combustion de la charge et la détente des gaz 35
49. Pression en vase clos, à un instant quelconque de la combustion 35
50. Densité de chargement. 37
Pression maximum des gaz en fonction de la densité de chargement. — Diagramme. 37
51. Force spécifique et module de chargement d'un explosif. . . 38
52. Force absolue d'un explosif 39
53. Densité gravimétrique. 39

§ 7.

Pressions des gaz pendant la détente.

NUMÉROS. PAGES.

54. Formule fondamentale donnant la pression des gaz pendant la détente 41
55. Formule à appliquer lorsqu'il y a simultanément détente des gaz et combustion de la charge 43

§ 8.

De la vivacité d'un explosif.

56. Définitions de la vitesse de combustion ; de la vivacité d'un explosif 45
57. Loi relative à la vitesse de combustion ; vitesse spécifique de combustion 45
58-59. Influence de l'amorce sur la valeur de la vitesse spécifique de combustion 46
60. Vitesse absolue de combustion 46

§ 9.

Marche à suivre pour déterminer expérimentalement les caractéristiques des explosifs.

61. Ce qu'on nomme caractéristiques d'un explosif 47
62. Mesure de la densité gravimétrique 47
63. Mesures des caractéristiques f, η et φ. 48
64. Des pertes de chaleur par les parois 49
65. Tableau des caractéristiques de quelques explosifs 50

§ 10.

Applications numériques.

66. Calculs 51

CHAPITRE II.

Effets des explosifs sur les parois des projectiles.

§ 1.

Relation entre la pression et le temps, la charge se comburant dans une capacité fermée.

NUMÉROS. PAGES.

67. Relation entre la pression et le temps, lorsque la charge se combure dans une capacité fermée. 53
Ce qu'il faut entendre par charge minimum de rupture . . . 54
68. Influence de l'amorce sur la durée de combustion 55
69. Diagramme des pressions en fonction du temps 56

§ 2.

Mesure des effets.

70-71. Résultats d'expériences relatives à la rupture 57
72. De l'indice de rupture d'une charge 58
73. Maximum de l'indice de rupture d'un explosif 58
74. Calcul de la charge minimum capable de produire la rupture d'une enveloppe d'indice de résistance donné 59
75. Relation entre les charges équivalentes pour la rupture . . . 60
76. De l'indice de projection d'une charge 61
77. Maximum de l'indice de projection d'un explosif. 61
78. Rapport entre les poids des charges équivalentes pour la projection 62
79. Résumé des considérations relatives à la mesure des effets . . 62

§ 3.

Echelles des forces et des vivacités absolues.

80 à 82. Tableaux des forces et des vivacités absolues 63
83. Application numérique. 64

CHAPITRE III.

Du choix des explosifs de rupture.

§ 1.

Inconvénients que présente la poudre noire, au point de vue du chargement des projectiles.

NUMÉROS. PAGES.

84-87. Inconvénients de la poudre noire, au point de vue du chargement des projectiles . . . . . 67 à 68

§ 2.

Emploi des explosifs de grande force spécifique.

88. Avantages à retirer de l'emploi des explosifs de grande force spécifique, pour le chargement des projectiles 69

89 à 92. Dispositions prises pour éviter l'explosion dans l'âme 70

93. Considérations relatives à l'utilisation du détonateur 71

§ 3.

Marche à suivre dans les essais de réception des explosifs de rupture.

94. Etat de la question 72

95. Epreuve préliminaire 72

96. Epreuve de conservation 72

97. Epreuve de tir. 73

98. Epreuve du détonateur. 73

99. Epreuve d'éclatement au repos 74

100. Tableau donnant les renseignements relatifs aux explosifs de rupture en usage dans les diverses Puissances. 75

CHAPITRE IV.

Effets des poudres dans les armes à feu.

§ 1.

Conditions dans lesquelles doit s'opérer la combustion des poudres.

NUMÉROS. PAGES.

101. Action des gaz dans une arme à feu 77
102. Ce qu'on nomme : vitesse initiale et force vive initiale du projectile 77
Effet utile de la charge 78
103. De la régularité de la combustion 78
104. Charge normale et charges réduites ; organisation des charges réduites 79
105-106. Rappel des lois de la combustion. — Remarque relative aux grains équivalents, au point de vue balistique 80

§ 2.

Loi fondamentale de la détente des gaz dans une arme à feu.

107. Comment on tient compte du tracé intérieur de l'arme à feu, dans les formules 82
Ce qu'il faut entendre par longueur réduite de la chambre . 83
108. Phases de la détente 83
109. Marche à suivre pour déterminer expérimentalement la valeur de l'exposant n entrant dans la formule de la pression . . 84

§ 3.

Lois du mouvement du projectile pendant la combustion de la charge.

110. Hypothèses 85
111. Expression de la vitesse du projectile, en fonction de la variable u 85
112. Formule donnant la vitesse du projectile à la fin de la combustion de la charge. 86
113. Conclusions déduites de la formule des vitesses. 86
114. Expression du chemin parcouru par le projectile, en fonction de la quantité u 87

NUMÉROS. PAGES.

Ce qu'on nomme coefficient de tir 88
115. Formes du coefficient de tir. 88
116. Formule donnant le chemin parcouru par le projectile pendant la combustion de la charge 89
Conclusions déduites de cette formule 89
117. Comment on détermine le poids de la plus petite des charges se comburant dans l'âme 89
118. **Expression de la pression, en fonction de la variable u** . . . 90
119. Pression au moment où la charge est entièrement comburée . 90
120-121. De la pression maximum des gaz. 91
122. Expression de la durée du trajet, en fonction de la quantité u. 93

§ 4.

Loi du mouvement du projectile, après la combustion de la charge.

123. Pression en fonction du chemin parcouru 94
124. Vitesse du projectile en fonction du chemin parcouru . . . 94
125. Expression de la vitesse initiale. Conclusions 95

§ 5.

Représentation graphique des lois du mouvement d'un projectile dans une arme à feu déterminée.

126. But de cette représentation 96
127. Diagramme des vitesses 96
128 à 130. Diagramme des pressions . . . . . 98 à 101
131. Expression de la pression moyenne 102
132. Diagramme des durées 102

§ 6.

Théorie de la similitude.

133. Définitions des armes semblables et semblablement chargées. 104
134. But de cette théorie 104
135. Lois de la similitude complète 104
136. Lois de la similitude relatives aux armes tirant la même poudre 107
137. Application 108

§ 7.

Théorie du recul des armes à feu.

NUMÉROS. PAGES.

138. Inconvénients du recul. — But principal de cette théorie . . 110
139. Hypothèses faites dans les calculs 110
140 à 143. Calcul de la résistance d'un frein d'affût . . . . . 110 à 114
144-145. Lois du recul libre 114
146-147. Résultats d'expériences 115

§ 8.

Théorie de la rayure.

148. Considérations préliminaires 116
149. Profil à dent de scie et profil à flancs parallèles. 116
150. Définitions du point directeur d'un profil ; du cylindre directeur ; de la directrice de la rayure ; du pas de la rayure ; de la transformée de la directrice. 117
151. Equation de la transformée de la directrice 119
152. Calcul du pas d'une rayure uniforme 120
153. Relation entre la vitesse angulaire de rotation et la vitesse de translation du projectile 121
154. Accélération de la rotation 122
155. Influence du forcement sur la pression maximum des gaz et sur la vitesse initiale du projectile 123
156. Hypothèses admises dans le calcul des réactions du projectile sur l'arme à feu 124
157-158. Représentation graphique des réactions . . . . . 124 à 126
159. Calcul des réactions normales aux tenons et des réactions parallèles à l'axe du canon 126
160-161. Conclusions à déduire de la formule relative à la pression normale au tenon 129
162-163. Conclusions tirées de l'expression de la résistance parallèle à l'axe du canon 131
164. Applications numériques relatives à la théorie de la rayure . 133

§ 9.

Applications des lois du mouvement du projectile dans l'âme.

165 à 167. Applications numériques des lois du mouvement du projectile dans l'âme. Comparaison des résultats du calcul et de l'expérience . . . . . 132 à 145

CHAPITRE V.

Du choix des poudres de tir.

§ 1.

Du rendement de l'arme à feu.

NUMÉROS. PAGES.

168. Ce qu'on nomme rendement 147
169. Causes qui affaiblissent le rendement 148
170. Exemples concernant le calcul du rendement 148
171. Considérations dont il faut tenir compte, lorsqu'on envisage le rendement 149

§ 2.

Des moyens à mettre en œuvre pour obtenir le plus grand effet utile des poudres, lorsque l'arme à feu et le projectile sont déterminés.

172. De la pression limite 150
173. Eléments dont on dispose pour modifier la pression maximum des gaz et la vitesse initiale du projectile 150
174. Choix des éléments caractérisant la nature de la poudre et la forme du grain 151
175-176. Détermination du poids de la charge et de l'épaisseur du grain. 152
177. Appropriation d'une poudre pour le tir de diverses armes à feu 153

§ 3.

Influence des éléments de l'arme à feu et du projectile sur l'effet utile.

178. Caractéristiques de l'arme à feu et du projectile sur lesquelles on peut agir pour accroître l'effet utile. 154
179 à 181. Moyens préconisés pour obtenir de grandes forces vives initiales . . . . . 154 à 158
182. Influence du volume de la chambre à poudre sur la pression maximum des gaz et la vitesse initiale du projectile . . . 159

§ 4.

Les améliorations des poudres de tir.

NUMÉROS. PAGES.
183. Considérations préliminaires 160
184. Evolution des poudres pour bouches à feu 160
185. Evolution des poudres pour fusils 162
186. Tableau des poudres de tir en usage en Belgique 163
187. Tableau des poudres de tir sans fumée en usage à l'étranger . 164

§ 5.

Epreuves de réception des poudres de tir.

188 à 191. Epreuves à considérer 165
192-193. Epreuve de puissance 165
194-195. Epreuve de régularité. 167
196-197. Détermination des caractéristiques des poudres, par le tir . . 170

CHAPITRE VI.

Appareils balistiques.

---

§ 1.

Mesure de la vitesse d'un projectile.

198 à 203. Description et emploi du chronographe Leboulengé . . 175 à 184

§ 2.

Mesure de la vitesse du recul d'une arme à feu.

204 à 206. Description et emploi du vélocimètre . . . . . 185 à 187

§ 3.

Mesure de la pression des gaz.

207-208. Description et emploi de l'appareil crusher ordinaire. — Principe du crusher enregistreur. 188